Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

образования

«Ульяновский государственный технический университет»

На правах рукописи

АЛЬТАХЕР АББАС А. КАРИМ

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА С ПОВЫШЕННОЙ СПОСОБНОСТЬЮ ДЕМПФИРОВАНИЯ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук доцент Доманов В.И.

Ульяновск 2021

оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И ПУТИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КОНВЕЙЕРОВ	12
1.1. Обзор существующих технических решений	12
1.2. Энергоэфективность работы электропривода конвейера	14
1.3. Структура ЭТК с двумя проводными барабанами на основе	
схемы электрического вала	17
1.4 Регулируемый электропривод для подъемно-транспортных механизмов	21
1.5. Современные схемы построения электротехнических комплексов	
конвейеров	26
1.6 Влияние неравномерности скорости движения конвейера на его	
характеристики	28
1.7. Выводы по первой главе	31
2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА КОНВЕЙЕРА С УЧЕТОМ УПРУГОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ ЛЕНТЫ	32
2.1. Математическая модель электротехнического комплекса	
однобарабанного ленточного конвейера с асинхронным исполнительным	
двигателем	32
2.2. Передаточные функции электротехнического комплекса	
однобарабанного ленточного конвейера с асинхронным исполнительным двигателем	37
2.3. Компьютерное моделирование электротехнического комплекса	
однобарабанного ленточного конвейера с асинхронным исполнительным	
двигателем и оценка адекватности полученных передаточных функций	47
2.4. Математическая модель электротехнического комплекса	
двухбарабанного ленточного конвейера с асинхронными	
исполнительными двигателями	58
2.5. Компьютерное моделирование электротехнического комплекса	
двухбарабанного ленточного конвейера с асинхронными	
исполнительными двигателями	64
2.6. Выводы по второй главе	68

3. СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА	69
3.1. Критерии синтеза системы управления электротехническим	
комплексом ленточного конвейера	69
3.2. Структурно-параметрический синтез системы управления	
электротехническим комплексом однобарабанного ленточного конвейера	70
3.3. Компьютерное моделирование электропривода однобарабанного ленточного конвейера	77
3.4. Структурно-параметрический синтез системы управления	
электротехническим комплексом двухбарабанного ленточного конвейера	89
3.5. Выводы по третьей главе	102
4. РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА	103
4.1. Обоснование необходимости разработки вычислителей координат	
электропривода ленточного конвейера	102
4.2. Разработка вычислителя момента асинхронного двигателя	104
4.3. Разработка вычислителя скорости асинхронного двигателя	112
4.4. Компьютерное моделирование системы управления	
электротехническим комплексом однобарабанного ленточного конвейера	
с разработанными вычислителями момента и скорости	119
4.5. Компьютерное моделирование системы управления	
электротехническим комплексом двухбарабанного ленточного конвейера	
с разработанными вычислителями параметров движения асинхронных	
двигателей	123
4.6. Выводы по четвертой главе	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	133
ПРИЛОЖЕНИЯ	142

введение

Актуальность работы. Конвейеры широко используются в добывающей и перерабатывающей промышленности. Процесс перемещения груза усложняется внешними и внутренними факторами. К ним можно отнести: упругость конвейерной ленты, действие диссипативных сил, случайный характер нагрузки, сложность описания асинхронного двигателя и др. При этом большинство электроприводов конвейеров простейшие существующих имеют схемы реостатное регулирование). управления (ступенчатое Это существенно ограничивает возможности таких структур и не позволяет в полном объеме решать поставленные задачи. Широкое распространение частотных преобразователей, их доступность возможность создания электропривода с требуемыми И характеристиками привело к тому, что передовые производители конвейеров (например, ONT SpA) начали использовать частотно-регулируемые асинхронные электроприводы в своей продукции. Это позволило решить ряд вопросов, связанных с работой конвейера: безударный пуск, снижение скорости в режиме наладки и малой нагрузки и повышение энергоэффективности.

Многие российские и зарубежные ученые посвятили свои работы регулируемым асинхронным электроприводам, в том числе для управления конвейерами: А.А. Булгаков¹, И.Я. Браславский², Г.И. Бабокин³, В.И. Галкин⁴, В.А. Денисов⁵, С.А. Ковчин⁶, А.Е. Козярук⁷, В.Г. Макаров⁸, В.Н. Мещеряков⁹,

¹ Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М.: Наука, 1966. – 297с. ² Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением / И.Я. Браславский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.

³ Бабокин Г.И. Математическая модель энергосберегательного безредукторного электропривода скребкового конвейера / Г.И. Бабокин, В.А. Готовцева / Известия ТулГУ. Технические науки, 2018. с. 12-17.

⁴ Галкин В.И. Транспортные машины / В.И. Галкин, Е.Е. Шешко. – М.: Горная книга, 2010. – 588 с.

⁵ Денисов В.А. Электроприводы переменного тока с частотным управлением / В.А. Денисов. - Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 164 с.

⁶ Ковчин С.А. Теория электропривода / С.А. Ковчин, Ю.А. Сабинин. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с. ⁷ Козярук А.Е. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых

электроприводов / А.Е. Козярук, В.В. Рудаков. – СПб.: СПб электротехническая компания, 2004. – 127 с. ⁸ Макаров В.Г. Анализ современного состояния теории и практики асинхронного электропривода / В.Г.

Макаров // Изв. вузов: Проблемы энергетики. – Казань: КГЭУ, 2010, №11-12. – с. 109-120.

⁹ Мещеряков В.Н. Инверторы и преобразователи частоты для систем электропривода переменного тока / В.Н. Мещеряков. – Липецк: ЛГТУ, 2014. – 89 с.

О.И. Осипов¹⁰, А.Д. Поздеев¹¹, О.В. Слежановский¹², А.В. Стариков¹³, И.И. Эпштейн¹⁴, F. Blaschke¹⁵, B.K. Bose¹⁶, J. Holts¹⁷, W. Leonard¹⁸.

Большое количество работ посвящено применению стандартных настроек регуляторов электропривода. При этом асинхронный двигатель представляется либо нелинейной структурой, либо существенно упрощенной передаточной функцией 2-3 порядков. В то же время отсутствуют работы, посвященные вопросам синтеза электропривода конвейера, учитывающие упруго-диссипативные свойства транспортной ленты и вариацию параметров асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении. Так же представляет интерес реализация бездатчикового электропривода с асинхронным исполнительным двигателем, что позволяет производить модернизацию существующих ленточных конвейеров без изменения конструкции механической части.

Таким образом, ряд вопросов совершенствования электроприводов конвейеров с учетом указанных требований остаются открытыми. Это позволило сформулировать тему актуального исследования.

Целью диссертационной работы является структурно-параметрический синтез электропривода конвейера, позволяющий демпфировать упругие колебания транспортной ленты.

Объект исследования – электротехнический комплекс однобарабанного и двухбарабанного ленточного конвейера.

 $^{^{10}}$ Терехов В.М. Системы управления электроприводов / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: Издат. центр «Академия», 2005. – 304 с.

¹¹ Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах / А.Д. Поздеев. – Чебоксары: изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 172 с.

¹² Слежановский О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов, Е.Д. Лебедев, Л.М. Тарасенко. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

¹³ Стариков А.В. Линеаризованная математическая модель асинхронного электродвигателя как объекта системы частотного управления // Вестник Самарского гос. тех. университета. Выпуск 16. Серия «Физико-математические науки». – Самара: СамГТУ, 2002. – с.175-180.

¹⁴ Эпштейн И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока / И.И. Эпштейн. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 192 с.

¹⁵ Blaschke F. Das Prinzip Feldorientierung die Grundlage fur Transvektor-Regelung von Drehfeldmachinen. – «Siemens-Z», 1971, 45, №10.

¹⁶ Bose B.K. Modern power electronics and AC drives. – Prentice-Hall Inc., 2002. – 711 p.

¹⁷ Holts J. Sensorless Control of Induction Motor Drives / Proceedings of the IEEE, Vol. 90, №8, 2002. – pp. 1359-1394.

¹⁸ Leonard W. Control of Electrical Drives. – Berlin: Springer, 1996/ - 420 p.

Предмет исследования – частотно-регулируемый электропривод со скалярным управлением асинхронным двигателем, работающем на нагрузку с упруго-диссипативными свойствами.

Задачи диссертационного исследования

1. Создание математических моделей электротехнического комплекса однобарабанного и двухбарабанного конвейера с учетом упруго-диссипативных сил, действующих в транспортной ленте.

2. Структурный синтез электропривода конвейера, обладающей повышенной способностью демпфирования колебаний в транспортной ленте.

3. Параметрический синтез регуляторов электропривода, обеспечивающий требуемый характер переходных процессов.

4. Разработка вычислителей координат, позволяющих применять электропривод с повышенной способностью демпфирования колебаний на существующих ленточных конвейерах без изменений в конструкции механической части.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана линеаризованная математическая модель электротехнического комплекса однобарабанного ленточного конвейера, отличающаяся учетом начальных условий потокосцеплений асинхронного исполнительного двигателя и упруго-диссипативных свойств транспортной ленты.

2. Предложен способ структурного построения электропривода ленточного конвейера, отличающийся наличием внутреннего контура регулирования момента и позволяющий эффективно демпфировать колебания в упругой системе транспортной ленты

3. Разработана методика синтеза регуляторов электропривода ленточного конвейера, отличающаяся выбором желаемых передаточных функций разомкнутых контуров и обеспечивающая монотонный характер переходных процессов.

4. Разработан наблюдатель скорости ротора асинхронного двигателя, отличающийся вычислением скорости по измеренным действующим значениям тока, фазного напряжения и частоты на основе уточненной линеаризованной модели двигателя.

5. Предложен способ структурного построения системы управления электротехническим комплексом двухбарабанного ленточного конвейера, отличающийся введением перекрестных связей по углам поворота роторов асинхронных двигателей и обеспечивающий снижение амплитуд колебаний процесса растяжения-сжатия транспортной ленты.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель ЭТК конвейера, учитывающая параметры двигателя в рабочей точке и упруго-диссипативные свойства конвейерной ленты.

2. Структурные схемы электроприводов однобарабанного и двухбарабанного ленточного конвейера, обеспечивающие снижение амплитуд колебаний транспортной ленты.

3. Методика синтеза регуляторов электропривода конвейера, обеспечивающая монотонный характер переходных процессов.

4. Принципы построения вычислителей момента и скорости асинхронного двигателя.

5. Результаты натурных экспериментов по определению погрешности разработанных вычислителей.

Практическая значимость результатов работы

1. Разработанный электропривод позволяет провести модернизацию электротехнического комплекса ленточного конвейера с минимальными изменениями в конструкции механической части.

2. Новая методика синтеза регуляторов электропривода ленточного конвейера проста в инженерном применении и реализована в виде расчетного файла в программе MathCAD.

3. Использование разработанного электропривода позволяет увеличить ресурс транспортной ленты конвейера с двумя приводными барабанами.

4. Результаты работы использованы при модернизации электрооборудования транспортера на Сенгилеевском цементном заводе Ульяновской области.

Методы исследования.

При решении поставленных задач использовались методы теории электропривода, электрических машин, механических колебаний, численного моделирования в программной среде «Matlab Simulink».

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались, получили положительную оценку, на следующих НТК:

1. Поволжская научно – практическая конференция, г. Казань 2015, 2016 г.

2. Международная конференция, Санкт-Петербургский государственный Технический университет, г. Санкт-Петербург 2016.

3. Международная (XX всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2016, г. Пермь. 2016г

4. Международная конференция Ивановского Государственного Энергетического Университета, г. Иваново 2017.

5. Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ», г. Санкт-Петербург, 2017 г.

6. XV Международная научная конференция «Инновации в науке, образовании и предпринимательстве – 2017», г. Калининград, 2017 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, общим объемом 4,7 п.л., в том числе 5 работ в изданиях, включенных в перечень ВАК, 9 работ в трудах и материалах Международных и Всероссийских конференций, 1 программа для ЭВМ.

Соответствие паспорту научной специальности

Исследования, выполненные в диссертационной работе, соответствуют формуле паспорта специальности 05.09.03 Электротехнические комплексы и системы в частности:

Использование электрической энергии и электротехнической информации, принципы и средства управления объектами определяющие функциональные

свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем промышленного, транспортного, бытового назначения и соответствует области исследований:

1. Изучение системных свойств и связей, математическое и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

2. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

3. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Во введении сформулирована актуальность задачи структурнопараметрического синтеза электропривода ленточного конвейера с повышенной способностью демпфирования упругих колебаний, показана степень ее разработанности, определены цели и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость, дана краткая аннотация работы в целом.

В первой главе рассмотрены известные структуры электроприводов конвейера и его кинематической цепи. Дана сравнительная оценка существующих технических решений, показаны недостатки и возможные пути улучшения этих электроприводов. Обоснована необходимость повышения демпфирования упругих колебаний.

Bo второй разработка главе проведена математической модели электротехнического комплекса конвейера с учетом упругости транспортной ленты. Составлена расчетная схема кинематической цепи для однобарабанного конвейера. На ее основе получена система нелинейных уравнений электропривода со скалярным частотным управлением асинхронного исполнительным двигателем. Произведена линеаризация уравнений в окрестности рабочей точки и получены функции электротехнического однобарабанного передаточные комплекса ленточного конвейера как объекта управления.

Разработана расчетная схема и составлены уравнения движения электротехнического комплекса двухбарабанного конвейера. Численные методы решения и компьютерное моделирование показали, что нестабильность скорости (несинхронность вращения роторов двигателей) приводит к колебательным процессам в транспортной ленте, что снижает ресурс ее работы.

В третьей главе выполнен структурно-параметрический синтез системы управления электротехнического комплекса ленточного конвейера с учетом нелинейности и нестационарности объекта управления и наличия упругодиссипативных сил в транспортной ленте. Предложено использовать электропривод, построенный по принципу подчиненного регулирования координат с внутренним контуром момента и внешним контуром скорости.

Основными требованиями к системе управления конвейера являются синхронизация вращения двигателей и исключение колебательных переходных процессов в контуре скорости. В связи с этим произведен параметрический синтез регуляторов разрабатываемого электропривода, обеспечивающий монотонный характер переходных процессов. Компьютерное моделирование электротехнического комплекса однобарабанного ленточного конвейера показало, что структурно-параметрический синтез электропривода привел к желаемому результату – исключению колебаний в транспортной ленте.

Произведено моделирование электротехнического комплекса двухбарабанного конвейера с выбранными настройками регуляторов. Результаты моделирования показали, что при действии синусоидальной помехи в сигнале датчика скорости появляются упругие колебания в транспортной ленте.

Для устранения этих недостатков было предложено ввести перекрестные обратные связи по разности сигналов датчиков углов поворота роторов асинхронных двигателей. В этом случае ключевым моментом в синтезе системы управления является выбор коэффициента передачи разностного сигнала, позволяющий минимизировать амплитуду колебаний процесса растяжения-сжатия транспортной ленты.

Четвертая глава посвящена разработке вычислителей координат электропривода ленточного конвейера. Для реализации разработанного

электропривода необходимо два датчика – момента и скорости АД. В существующих серийных конвейерах эти датчики отсутствуют. В то же время в частотных преобразователях имеются датчики токов и напряжений. Это позволило создать вычислители требуемых координат системы по измеренным действующим значениям токов и напряжений.

Разработана уточненная линеаризованная модель асинхронного двигателя, которая позволила получить формулу для расчета скорости асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении.

Натурные эксперименты показали, что погрешность разработанного вычислителя момента не превышает 6%, а вычислителя скорости – 1% от реальной величины в диапазоне скоростей, необходимых для функционирования ленточного конвейера.

Личный вклад автора.

Заключается в выполнении основного объема исследований, изложенных в работе, в анализе, обработке, обобщении результатов, формулировке выводов и проведении натурных экспериментов, а также в личном участии в апробации результатов и подготовке основных публикаций.

Структура и объем работы.

Основное содержание диссертационной работы изложено на 146 страницах машинописного текста, содержит 84 рисунка, 3 таблицы и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 125 наименований.

1 СУЩЕСТВУЮЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И ПУТИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КОНВЕЙЕРОВ

1.1 Обзор существующих технических решений

Конвейерны - это мобильное оборудование, предназначенное для перевозки места в другое. Ленточные конвейеры материалов из одного отличаются разгрузки без остановки конвейера, высокой возможностью загрузки И производительностью, длительностью транспортировки, высокой надежностью, простотой конструкции и эксплуатации. Конвейерны широко используются в сочетании с механическими системами в производственных процессах в различных областях промышленности, строительства, обслуживания и сельского хозяйства. Материалы должны транспортироваться по прямой с умеренной скоростью (от 1,5 до 6 метров в секунду[13,22,23,70,89].)

Конвейерная система используется во многих отраслях промышленности в качестве стандартного механического погрузочно-разгрузочного оборудования для перемещения товаров, продуктов, сырья и других материалов из одного места в другое, обычно в том же районе или здании. Конвейерные системы обеспечивают быструю и эффективную транспортировку материалов и продукции, а также возможность перемещать тяжелые грузы по производственной линии, что делает их популярными в сфере обработки материалов и упаковки, а также в добывающей промышленности .

Преимущества использования конвейерной системы

• материалы можно безопасно транспортировать с одного уровня на другой с помощью наземных конвейеров.

• возможность перевозить большое количество груза различной формы, размеров и веса.

Приводы ленточного конвейера выполняются: [31,47,62,65]

-однобарабанными с одним или двумя двигателями;

-двухбарабанными с раздельным расположением приводных барабанов на переднем и заднем концах конвейера, рисунок 1.1.

Однобарабанный привод считается самым надежным и простым. Он имеет ограниченный угол (до 240 градусов) охвата ленты вокруг барабана, меньшее усилие ленты и небольшие габаритные размеры, а также один изгиб ленты. При упругих колебаниях вероятен продольный или поперечный разрыв ленты, и это главное условие, определяющее влияние негативных факторов на надежность конвейера.

Существуют разные конструкции двухбарабанные приводов, наиболее популярными из которых являются устройства с одним приводным механизмом. В этой конструкции барабаны соединены друг с другом только конвейерной лентой (без дополнительной кинематической связи). В случае двухбарабанного привода угол охвата приводного цилиндра увеличивается до 400 градусов, что позволяет использовать ремень меньшей прочности, что является его основным преимуществом.



Рисунок 1.1– Схема двухбарабанного привода: а – с двумя двигателями, б – с тремя двигателями

Двухбарабанный привод в отличие от однобарабанного привода имеет большие габариты, более сложную конструкцию и меньшую надежность, так как многократные перегибы ленты снижают ее долговечность.

Для выбора места расположения и типа привода необходимо учитывать протяженность, профиль трассы и коэффициент использования прочности ленты.

Все электроприводы существующих ленточных конвейеров используют либо нерегулируемый, либо регулируемый при помощи многоступенчатого реостата привод [64,67,71,77].

Существует ряд основных требований, предъявляемых к электроприводам электротехнического комплекса конвейера [31,47,65,89]:

- обеспечение плавного пуска двигателей с ограниченными значениями моментов и ускорений;

- ограничение динамических усилий тягового органа;

- получение надежного сцепления ленты с приводными барабанами;

- создание значительных моментов при трогании конвейера в начале его пуска, так как сопротивление трения в покое примерно в 1,5 раза больше сопротивления трения при движении;

- поддержание в установившемся режиме заданной скорости движения рабочего органа;

- исключение (минимизация) упругих колебаний.

В некоторых случаях требуется регулирование скорости для того, чтобы поддержать необходимое сцепление между лентой и барабанами при изменении нагрузки. Целесообразно обеспечить автоматическое регулирование скорости ленты с плавным переходом от одного уровня скорости к другому, в зависимости от количества поступающего груза на конвейер. Равномерное распределение нагрузки между двигателями в электротехническом комплексе конвейера необходимо из-за различной жесткости характеристик отдельных двигателей. Отклонения в нагрузках разных двигателей достигают 15-30% в асинхронных ЭП с номинальным скольжением двигателей 4-6%. Чтобы выровнять нагрузки используют синхронизацию скорости асинхронных двигателей посредством постоянного включения цепь ротора дополнительных сопротивлений В [50,51,53,67].

1.2 Энергоэфективность работы электропривода конвейера

Производительность может быть улучшена в современной производственной среде за счет правильной конструкции механизма на начальном этапе

производства. Его можно использовать на ранней стадии производства, когда требуется конструкция конвейера для оптимальной производительности. Высокая эффективность ленточного конвейера помогает производителям получать более высокую производительность на этапах производства и обработки материалов [50,67]. Ленточные конвейеры широко используются в современной производственной среде для транспортировки сырья.

Регулировка скорости конвейера может снизить потребление электроэнергии. Активное управление электроприводом позволяет получить требуемый график разгона. Это дает возможность значительно снизить потребление энергии во время эксплуатации ЭТК конвейера,

Потребление электроэнергии ЭТК конвейера может увеличить расходы в обрабатывающей промышленности и привести к увеличению эксплуатационных расходов [53,99]. Постоянная борьба с конкурентами в обрабатывающих отраслях требует эффективного проектирования, которое может снизить использование операционных ресурсов [67,71]. Следовательно, для снижения общей стоимости производства требуется конструкция, позволяющая снизить потребление энергии. В исследованиях по повышению энергоэффективности системы ленточных конвейеров используется моделирование и оптимизация. Энергоэффективность ЭТК конвейера была изучена с учетом различных факторов, влияющих на потребление электроэнергии в электроприводе. Это позволило найти взаимосвязь между скоростью конвейерной ленты, динамикой загрузки ленты и уровнем энергии, потребляемой во время работы системы транспортирования. Контроль энергопотребления конвейером приводит к повышению энергоэффективности. Одним из возможных вариантов пострения энергосбереающего электропривода конвейера является использование адаптивного регулятора. Рассмотрим работу одного из возможных вариантов такого устройства.

Предлагаемый адаптивный регулятор напряжения асинхронного электропривода содержит датчики фазных токов и напряжений, звено выборкихранения, компаратор, реверсивный счетчик, сумматор.

Схема адаптивного регулятора напряжения асинхронного электропривода приведена на рисунок 1.2.

Предлагаемое устройство содержит датчик (1) тока фазы А, датчик (2) тока фазы В, датчик (3) напряжения фазы А, датчик (4) напряжения фазы В, которые соединены со входами звена вычислителя (5) значений критериев энергоэффективности, выходы которого подключены к входами коммутатора (6), выход которого поступает на звено (7) выборки хранения, последовательно соединенное с компаратором (8), реверсивным счетчиком (9), сумматором (10) и регулятором (11) напряжения.

Устройство работает следующим образом. Токи и напряжения на асинхронном двигателе измеряются с помощью датчиков 1 – 4 и поступают на звено вычислителя (5) значений критериев энергоэффективности: КПД, угол φ, относительный ток статора. В зависимости от условий эксплуатации коммутатором (6) выбирается сигнал требуемого критерия, который затем поступает на вход звена (7) выборки хранения, которое обеспечивает временную задержку сигнала, поэтому на вход компаратора (8) поступает текущее (в) и предшествующее (а) значение оптимизируемого параметра. На выходе компаратора (8) формируется два сигнала, условно (+) и (-) в зависимости от соотношений значений оптимизируемого параметра. Это позволяет управлять реверсивным счетчиком (9). Реверсивный счетчик (9) изменяет напряжение задания на регуляторе напряжения (11) за счет подачи сигналов на сумматор (10).

Эффективноть работы схемы достигается снижением потерь электроэнергии за счет оптимизации асинхронного электропривода под конкретный критерий энергоэффективности.



Рисунок 1.2 Схема адаптивного регулятора

С учетом большой мощности используемых двигателей и продолжительным режимом работы повышение энергоэффективности дает существенный экономический эффект в ЭТК конвейера.

1.3 Структура ЭТК с двумя проводными барабанами на основе схемы электрического вала

В двухбарабанных электроприводах необходимо решение следующих основных задач:

- синхронное вращение проводных двигателей;

- обеспечение натяжения ленты транспортёра.

Возможный вариант построения системы – использование схемы рабочего электрического вала на основе асинхронных машин с фазным ротором.

Возможность решения двух поставленных задач помощью АДФР привело к созданию следующей схемы [64,71,99] (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Схема рабочего электрического вала с поворотным статором Натяжение ленты может быть выполнено за счёт системы управления (поворот статора АДФР).

Рассмотрим подробную работу схемы. При правильной фазировке статора и ротора запуск схемы приводит во вращение барабаны двигатели М1 и М2, которые через редукторы синхронно вращают приводные барабаны конвейера.

Если возникает различие в нагрузках M_1 и M_2 , то по цепям роторов будут протекать токи, создающие синхронизирующие моменты на двигателях. Натяжение ленты на рабочем (транспортном) участке обеспечивается за счёт механического поворота статора M_2 на угол α . Это приводит к смещению вектора потока M_2 на угол α и соответственно по завершению переходного процесса будет происходить синхронное вращение M_1 и M_2 , но с угловым смещением между роторами (барабанами), что и обеспечит натяжение ленты конвейера.

Выражение для моментов двигателя имеет вид

 $M_{M1} = M_{ac} + M_{CUHX}$ $M_{M2} = M_{ac} + M_{CUHX}$

Где
$$M_{ac} = M_K \left[\frac{1 - \cos \theta}{S_{/S_K} + S_{K/S}} + \frac{1 + \cos \theta}{S_{/S_{K_1U_1}} S_{/S_{K_1U_1}}} \right];$$

 $M_{CUHX} = M_K S \sin \theta \left[\frac{1/S_K}{S_{/S_K} + S_{/S_K}} - \frac{1/S_{K_1U_1}}{S_{/S_{K_1U_1}} + S_{K_1U_1}} \right];$

M_K – критический момент; θ – угол смещения роторов.

 M_{ac} – асинхронный момент АДФР,

 M_{CUHX} – синхронный момент АДФР,

S-скольжение,

Sк –критическое естественное скольжение,

$$S_{K_1 U 1} = S_K \frac{R_2 + 2R_P}{R_2}$$

- критическое скольжение на искусственной характеристике;

R₂ - сопротивление фазы ротора.

На рисунке 1.4 приведены зависимости моментов АДФР от угла θ.



Рисунок 1.4 – Вращающие моменты рабочего электрического вала.

М_V-общий вращающий момент на машине электрического вала (M, v=1;2)

 $M_{\rm acuh}$ – асинхронная составляющая вращающего момента.

Описание свойств рабочего электрического вала осуществляется на основе схемы замещения рисунок 1.5.



Рисунок 1.5 – Схема замещения рабочего электрического вала

Угол смещения роторов α учитывается как поворот вектора напряжения статора U_{sm2} .

Особенностью электрического вала является ограниченность режима устойчивой работы. Приводится структурная схема, рисунок 1.6, для анализа работы при симметричных отклонениях от положения равновесия.

В этой структуре для соблюдения устойчивости необходимо выполнение условия $1 - (S/S_k) > 0$ [64,99]. Для увеличения S_K включают демпфирующие сопротивления Rp последовательно в цепи ротора.



Рисунок 1.6 – Структурная схема для анализа работы электрического вала.

Особенности работы и ограниченность возможностей по управлению и регулированию рассмотренной схемы, показывает необходимость создания перспективных ЭК транспортёров, обеспечивающих требуемые показатели по качеству и возможность автоматически регулировать и стабилизировать основные координаты: скорость, натяжение ленты, учёт изменения нагрузки.

1.4 Регулируемый электропривод для подъемно-транспортных механизмов

В имеющихся ЭТК задача пуска мощных конвейеров нашла решение в применении асинхронного двигателя с фазным ротором, при котором наблюдается ограничение пусковых токов и происходит формирование необходимой пусковой характеристики привода. К электроприводам ленточных конвейеров предъявляются жесткие требования по ограничению ускорений системы. Мощные конвейеры используют многодвигательный привод и возникает проблема распределения нагрузок между двигателями в установившемся и пусковом режиме. Включенные сопротивления позволяют поддерживать одинаковое скольжение двигателей и соответственно окружную скорость приводных барабанов, из-за длительной работы двигателей это приводит к значительным потерям электроэнергии.

Современные тенденции диктуют создание систем, которые обеспечивают экономию энергоресурсов и создают условия повышенного качества регулирования в технологических режимах. Необходимо создать эффективные в управлении и недорогие электротехнические комплексы для управления конвейерами.

В настоящее время для решения проблемы плавного пуска, синхронизации рабочих элементов, ограничения динамических нагрузок при переходных процессах применимы управляемые асинхронные электроприводы, имеющие следующие исполнения:

- система преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ – АД); - асинхронно-вентильный каскад (АВК);

- асинхронный привод с импульсным регулированием (ИП – АД).

Сравним возможности этих структур. Система ПЧ – АД может быть скалярной или векторной. Ограниченный диапазон регулирования, отсутствие существенная инерционность и другие характеристики объекта реверса, управления дают определенное предпочтение в использовании систем скалярного управления ПЧ – АД в ЭТК конвейеров. В этом случае частота и напряжение AД изменяются пропорционально питания напряжению управления [3,5,28,42,68,72,79,86,87]. Функциональная схема такого электропривода приведена на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7– Функциональная схема скалярного управления, где Рег – регуляторы координат, Дат – датчики обратных связей, В – выпрямитель, Ф – фильтр, ИН – инвертор напряжения.

Необходимо отметить ряд вариантов исполнения элементов схемы. Выпрямитель может быть управляемый или неуправляемый. Инвертор в свою очередь – на основе широтно-импульсного преобразователя, либо иметь ступенчатую коммутацию. От вариантов исполнения будет зависеть гармонический состав фазных токов АД, что непосредственно отражается на энергоэффективности электропривода.

Система АВК содержит в своем составе асинхронный двигатель с фазным ротором (АДФР), выпрямитель, инвертор, согласующий трансформатор (рисунок 1.8).

Рассматриваемая схема позволяет обеспечить возврат в сеть энергии ротора, что повышает энергоэффективность электропривода. В литературе [88] отмечается существенная нелинейность характеристик АВК и ограниченный диапазон регулирования.



Рисунок 1.8 – Схема асинхронно-вентильного каскада

Работа схемы ИП – АД заключается в следующем. При импульсном регулировании периодически изменяется какой-либо параметр электрической цепи, за счет чего обеспечивается регулирование координат электропривода. Наиболее часто рассматриваемая схема строится на основе АДФР (рисунок 1.9) [64,88].

Электронная часть схемы содержит один ключ (К), поэтому она удобна в наладке и эксплуатации. Фактором, ограничивающим ее применение, являются коммутационные возможности ключа.

Измеряемые координаты, которые могут использоваться при построении электропривода конвейера, следующие: частота вращения ротора, ток, напряжение, момент АД. Отмеченные ранее особенности объекта управления и предъявляемые к электроприводу требования позволяют сделать вывод, что частота вращения и момент могут быть получены с помощью вычислителей (наблюдателей) [2,6,7,10,11,25,30,33-36,39,55,58,59].



Рисунок 1.9 – Функциональная схема импульсного регулирования асинхронного двигателя с фазным ротором

Сравнение рассмотренных схем позволяют составить таблицу с основными рабочими характеристиками таких электроприводов.

Таблица 1.1

Характеристика	ПЧ – АД	АВК	ИП – АД
Типовая мощность	до 200 кВт	свыше 200 кВт	до 50 кВт
Диапазон	~ 100	2÷3	~ 20
регулирования			
Стоимость	средняя	высокая	средняя
электропривода			
Надежность	средняя	низкая	низкая
Быстродействие	среднее	низкое	среднее
Освоенность	высокая	низкая	низкая
промышленностью			
Наличие датчиков	ток, напряжение	ток	ток
Ремонтопригодность	высокая	низкая	средняя

Анализ данных таблицы 1.1 позволяет выбрать систему ПЧ – АД для управления конвейером подачи сырья на цементом заводе (рисунок 1.10). Суммарная протяженность конвейерных линий на предприятии превышает 2,5 км.



Рисунок 1.10 – Конвейер подачи сырья на цементном заводе

1.5Современные схемы построения электротехнических комплексов конвейеров

Задача управления технологическим процессом с помощью электропривода заключается в обеспечении наилучшего качества и точности регулирования параметров при минимальном расходе энергии и ресурсов и максимальном использовании возможностей электропривода. Кроме необходимо того, оптимальную отработку возмущающих воздействий обеспечить и низкую чувствительность к изменениям параметров объекта. Такая постановка задачи отличается от традиционной значительным усложнением модели объекта управления (электропривод является только его частью). Оптимизация системы управления ЭТК конвейера приводит к значительному экономическому эффекту, связанному со снижением расхода энергии и повышением качества продукции. Большое внимание в последние годы уделяется задачам управления с помощью электроприводов различными технологическими процессами. Анализ продукции

ведущих мировых производителей позволяет отметить следующие тенденции развития электропривода:

- увеличивается доля систем привода с двигателями переменного тока;

- преимущественное применение в настоящее время имеют приводы с короткозамкнутыми асинхронными двигателями;

- в связи с существенным усовершенствованием и удешевлением статических преобразователей частоты доля частотно-регулируемых асинхронных электроприводов быстро увеличивается;

- для большинства массовых применений приводов (насосы, вентиляторы, конвейеры, компрессоры и т.д.) требуется относительно небольшой диапазон регулирования скорости (до 1:10) и относительно низкое быстродействие. При этом целесообразно использовать классические структуры скалярного управления [9].

В качества первичных измерителей в существующих системах управления ЭП используются серийно выпускающиеся датчики тока и напряжения, датчики положения на эффекте Холла, тахогенераторы, фотоимпульсные датчики перемещения и кодовые положения, электромагнитные резольверы, синусновращающиеся трансформаторы и индуктосины с цифровым косинусные информации Объем съемом. использования новых типов датчиков (пьезоэлектрических, емкостных, ультразвуковых, лазерных и др.) весьма мал. Одна из причин стабилизации в области разработок первичных измерителей кроется в постепенном переходе к новым принципам получения информации об объекте с помощью косвенного измерения. Это позволило уменьшить количество датчиков (например, отказаться от применения датчика частоты вращения) и даже механического перемещения. Для совсем исключить датчики многих объектов, энергосиловой основой технологических которых является регулируемый электропривод, получение динамических моделей затруднено ввиду физических [3,15,16,18протекающих процессов сложности в них 20,26,45,49,52,75,76,103].

Качественное построение системы управления ЭТК конвейера возможно при подробном математическом описании неизменяемой части схемы: преобразователя, двигателя, кинематической цепи. Однако подробное представление АД при скалярном частотном управлении дает нелинейную связями. Поэтому необходимо структуру с перекрестными выполнить преобразования, позволяющие в итоге известными способами рассчитать корректирующие звенья. При их расчете необходимо учитывать требования демпфирования колебаний в электроприводе, что отражается на виде желаемой передаточной функции. Дополнительные задачи возникают при синтезе двухбарабанного электропривода. Это связано с вопросом регулирования натяжения ленты.

Одной из тенденций развития современных электроприводов является бездатчиковых систем. Это касается создание всех типов двигателей [1,4,8,24,27,38,43,46,57,60,69,100]. Подобные системы могут быть использованы в схемах общепромышленных механизмов, в том числе конвейерах. В то же время особенности работы вычислителей (помехи, погрешности вычислений, инерционность вычислительных алгоритмов) необходимо учитывать при синтезе системы управления.

1.6 Влияние неравномерности скорости движения конвейера на его характеристики.

В настоящее время возрастают требования к характеристикам действующих и создаваемых конвейеров . В первую очередь это касается повышения производительности (Q). Известно, что она определяется выражением [61]

$$Q = Km_n V_K$$

Где m_n -масса перемещаемого груза; V_k -скорость движения ленты конвейера.

Неоднократно отключалось, это одним из основных недостатков ЭТК конвейеров является колебательность скорости движения ленты [61]

$$V_k = V_{k=} + V_{k\sim}$$

Колебательность составляющая $V_{k\sim}$ создаёт дополнительную нагрузку (усилие $F_{H\sim}$) На конвейерную ленту, что может привести к её разрыву. По этому необходимо соблюдение условия.

$$F_{\rm дон} > F_H = F_{H=} + F_{H\sim}$$

Где *F*_{дои} – допустимое усилие растяжения ленты

 F_{H^-} действующее усилие растяжения на ленту в процессе работы .

Оценим влияние на $F_{H^{-}}$ массы перемещаемого груза m_n скорости движения V_k . Известно выражение [61]

$$F_H = K_1 m_{\Sigma} + m_{\Sigma} \frac{dv_n}{dt}$$

Где m_{Σ} суммарная масса движения частей.

Примем условие $F_H = const.$ На основании этого можно получить выражение.

$$m_{\Sigma} = \frac{F_H}{K_1 + \frac{dv_n}{dt}}$$

Видно (Рисунок 1.11) , что с ростом производной по скорости необходимо снижать m_{Σ}



Рисунок 1.11 Зависимость $m_{\Sigma} = f(\frac{dv_n}{dt})$

синусоидальному

$$V_{n\sim} = A \sin \omega t$$

В этом случае

$$\frac{dv_n}{dt} = A\omega\cos\omega t$$

Видно, что с ростом частоты колебаний растёт $\frac{dv_n}{dt}$ В свою очередь ω близка к частоте резонанса системы Ω_P .. Для двух массовой системы ω_p находится ω формула [78]

$$\Omega_p = \sqrt{\frac{c(m_1 + m_2)}{m_1 \cdot m_2}}$$

Где *m*₁-масса подвижных частей двигателя и редуктора; *m*₂-масса перемещаемого груза и ленты.

Если выполняется условие $m_2 > m_1...$ то

$$\Omega_p \approx \sqrt{C/m_1}$$

Поэтому Ω_p будет определяться упругостью ленты и массой m_1 . Колебания массы груза при соблюдении указанного условия будет оказывать не значительное влияние. В связи с этим целесообразно использовать регулируемый электропривод в управлении конвейером для минимизации колебательных процессов в системе.

1.7 Выводы по первой главе

В результате анализа, выполненного в этой главе, были определены следующие задачи, требующие решения:

- 1. Создание модели ЭТК однобарабанного и двухбарабанного конвейера с учетом упруго-диссипативных сил, действующих в транспортной ленте.
- 2. Структурный синтез электропривода конвейера, обладающей повышенной способностью демпфирования колебаний в транспортной ленте.
- 3. Параметрический синтез регуляторов электропривода, обеспечивающий требуемый характер переходных процессов.
- 4. Разработка вычислителей координат, позволяющих применять электропривод с повышенной способностью демпфирования колебаний на существующих ленточных конвейерах без изменений в конструкции механической части.

2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА КОНВЕЙЕРА С УЧЕТОМ УПРУГОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ ЛЕНТЫ

2.1 Математическая модель электротехнического комплекса однобарабанного ленточного конвейера с асинхронным исполнительным двигателем

Рассмотрим математическую модель электротехнического комплекса однобарабанного ленточного конвейера, приводимого в движение асинхронным двигателем (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Упрощенная кинематическая схема однобарабанного ленточного конвейера, где 1 – двигатель, 2 – редуктор, 3 – барабан, 4 – лента

Расчетную схему кинематической цепи рассматриваемого ленточного конвейера можно представить следующим образом (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Упрощенная расчетная схема кинематической цепи однобарабанного ленточного конвейера

Она составлена в рамках известных допущений:

- кинематические цепи редуктора и приводного барабана являются абсолютно жесткими и характеризуются коэффициентами передачи *i*_{p1}, *i*₆₁ и моментом инерции *J*₆₁;
- лента конвейера с достаточной степенью точности может быть описана математической моделью Келвина с сосредоточенной жесткостью C_n и коэффициентом рассеяния энергии D_n [41,85,92];
- рассеяние энергии пропорционально скорости деформации ленты;
- трение ленты об опоры моделируется сухим кулоновским трением F_{mp} ;
- *S*₁ перемещение транспортной ленты при заходе на приводной барабан,
 *S*₂ перемещение транспортной ленты при сходе с контрприводного барабана.

Для единообразия в формулах перемещение обозначено переменной X. Расчетная схема кинематической цепи также учитывает момент инерции ротора асинхронного двигателя $J_{\partial 1}$.

Расчетная схема позволяет составить уравнения движения однобарабанного ленточного конвейера совместно с асинхронным исполнительным двигателем, для регулирования скорости которого применяется скалярное частотное управления с линейным законом изменения напряжения в функции частоты [88, 90, 91].

$$\frac{d\psi_{11x}}{dt} = U_{11x} - \frac{R_{11}L'_{21}}{\Delta_1}\psi_{11x} + \frac{R_{11}L_{01}}{\Delta_1}\psi_{21x} + \omega_{01}\psi_{11y};$$

$$\frac{d\psi_{11y}}{dt} = U_{11y} - \frac{R_{11}L'_{21}}{\Delta_1}\psi_{11y} + \frac{R_{11}L_{01}}{\Delta_1}\psi_{21y} - \omega_{01}\psi_{11x};$$

$$\frac{d\psi_{21x}}{dt} = -\frac{R'_{21}L_{11}}{\Delta_1}\psi_{21x} + \frac{R'_{21}L_{01}}{\Delta_1}\psi_{11x} + (\omega_{01} - \omega_1)\psi_{21y};$$

$$\frac{d\psi_{21y}}{dt} = -\frac{R'_{21}L_{11}}{\Delta_1}\psi_{21y} + \frac{R'_{21}L_{01}}{\Delta_1}\psi_{11y} - (\omega_{01} - \omega_1)\psi_{21x};$$

$$M_{\partial 1} = \frac{3Z_{n1}L_{01}}{2\Delta_1}(\psi_{11y}\psi_{21x} - \psi_{11x}\psi_{21y});$$

$$M_{\partial 1} = \frac{3Z_{n1}L_{01}}{2\Delta_1}(\psi_{11y}\psi_{21x} - \psi_{11x}\psi_{21y});$$

$$M_{\partial 1} = \frac{2\pi f_{11}}{2\Delta_1}; \quad \omega_1 = \frac{d\varphi_1}{dt^2} = M_{c1};$$

$$U_{11x} = k_{U1}f_{11} + U_{01}; \quad U_{11y} = k_{U1}f_{11} + U_{01};$$

$$\omega_{01} = \frac{2\pi f_{11}}{Z_{n1}}; \quad \omega_1 = \frac{d\varphi_1}{dt};$$

$$F_x = C_x(S_1 - S_2) + D_x \frac{d(S_1 - S_2)}{dt};$$

$$F_x - F_n - F_{mp} = m\frac{d^2S_2}{dt^2}; \quad F_{mp} = f_{mp}F_Nsign\frac{dS_2}{dt};$$

$$(2.1)$$

где ψ_{11x} и ψ_{11y} – проекции вектора потокосцепления статора в ортогональной системе координат ∂xy , вращающейся со скоростью магнитного поля; U_{11x} и U_{11y} – проекции изображающего вектора напряжения в той же системе координат; ψ_{21x} и ψ_{21y} – соответствующие проекции вектора потокосцепления ротора; L_{11} и R_{11} – индуктивность и активное сопротивление цепи статора; L'_{21} и R'_{21} – приведенные индуктивность и активное сопротивление цепи ротора; L_{01} – взаимная индуктивность; ω_{01} – угловая скорость вращения магнитного поля; ω_1 – угловая частота вращения ротора двигателя; Z_{n1} – число пар полюсов; M_{o1} – электромагнитный момент двигателя; M_{c1} – момент сопротивления на валу; $\Delta_1 = L_{11}L'_{21} - L^2_{01}$; f_{11} – частота питающего напряжения; k_{U1} – коэффициент

пропорциональности, U_{01} – напряжение при нулевой частоте; F_n – сила, прикладываемая от барабана к ленте; F_n – сила, необходимая для подъема груза; F_{mp} – сила трения ленты о роликовые опоры; f_{mp} – усредненное значение коэффициента трения; F_N – нормальная к плоскости ленты составляющая силы; φ_1 – угол поворота ротора двигателя; φ_{11} – угол поворота приводного барабана; S_1 – перемещение транспортной ленты при заходе на приводной барабана; S_2 – перемещение транспортной ленты при сходе с контрприводного барабана; m – суммарная масса перемещаемого груза и транспортной ленты; t – время.

Система уравнений (2.1) позволяет построить структурную схему электротехнического комплекса ленточного конвейера как объекта управления (рисунок 2.3). За входную координату взята частота питающего напряжения f_{11} , а выходную – перемещение ленты с грузом в районе контрприводного барабана x_2 . На структурной схеме приняты следующие обозначения: $T_{11} = \frac{\Delta_1}{R_{11}L'_{21}}$, $T_{21} = \frac{\Delta_1}{R'_{21}L'_{11}}$ – электромагнитные постоянные времени цепей статора и ротора асинхронного двигателя; $T_n = \frac{D_n}{C_n}$ – диссипативная постоянная времени, характеризующая рассеяние энергии в транспортной ленте; p – оператор дифференцирования.

Анализ системы уравнений (2.1) и структурной схемы, приведенной на рисунке 2.3. показывает, что электротехнический комплекс ленточного конвейера представляет собой нелинейный объект. Нелинейность связана, прежде всего, наличием множительных звеньев в математической модели асинхронного скалярном частотном управлении, a нелинейной двигателя при также характеристикой, описывающей действие сил трения. Разработанная структурная схема электротехнического комплекса ленточного конвейера позволяет моделировать его движение и исследовать влияние различных факторов на работу комплекса.



Рисунок 2.3 – Структурная схема электротехнического комплекса однобарабанного ленточного конвейера как объекта управлении
Однако, большой интерес представляет линеаризация математической модели определение ленточного конвейера и определение его основных передаточных функций. Это позволит в конечном итоге корректно подойти к синтезу системы управления электротехническим комплексом ленточного конвейера.

2.2 Передаточные функции электротехнического комплекса однобарабанного ленточного конвейера с асинхронным исполнительным двигателем

Поэтому поставим перед собой задачу определения следующих передаточных функций:

- результирующую передаточную функцию однобарабанного конвейера,
 характеризующую изменение перемещения S₂ при изменении частоты f₁₁
 питающего напряжения статора исполнительного асинхронного двигателя;
- передаточную функцию однобарабанного конвейера, связывающую скорость V₂
 движения ленты и груза в районе натяжного барабана с частотой f₁₁ питающего напряжения;
- передаточную функцию конвейера, связывающую изменение перемещения S₂ с силой F_n, необходимой для подъема перемещаемого груза;
- передаточную функцию, характеризующую изменение скорости V_2 при вариации силы F_n .

Полная линеаризация уравнений асинхронного двигателя приводит к тому, что его передаточная функция, связывающая скорость ротора ω_1 с частотой f_{11} питающего напряжения имеет характеристический полином 15 порядка [91]. Это сильно усложняет математическую модель ленточного конвейера и синтез регуляторов системы управления. Поэтому воспользуемся приближенным методом линеаризации [14,54,63,81], заменяя операции умножения переменных в (2.1) следующими упрощенными выражениями:

$$\omega_{01}\psi_{1y} = \psi_{1y0}\omega_{01}; \qquad (2.2)$$

$$\omega_{01}\psi_{1x} = \psi_{1x0}\omega_{01}; \qquad (2.3)$$

$$(\omega_0 - \omega)\psi_{2y} = \psi_{2y0}(\omega_0 - \omega); \qquad (2.4)$$

$$(\omega_0 - \omega)\psi_{2x} = \psi_{2x0}(\omega_0 - \omega); \qquad (2.5)$$

$$\psi_{1y}\psi_{2x} = \psi_{1y0}\psi_{2x}; \qquad (2.6)$$

$$\psi_{1x}\psi_{2y} = \psi_{1x0}\psi_{2y}, \qquad (2.7)$$

где Ψ_{1x0} , Ψ_{1y0} , Ψ_{2x0} и Ψ_{2y0} – начальные условия.

В первом приближении будем считать, что производная $\frac{dS_2}{dt}$ не меняет знак при движении конвейера. Тогда нелинейность типа «сухое трение» можно заменить постоянной величиной F_{mp} , независящей от скорости перемещения $\frac{dS_2}{dt}$.

Подставляя формулы (2.2) – (2.7) в (2.1) и избавляясь от нелинейности «сухое трение» получим следующую линеаризованную систему уравнений, описывающих электротехнический комплекс однобарабанного ленточного конвейера.

$$(T_{11}p+1)\psi_{11x} = T_{11}U_{11x} + \frac{L_{01}}{L_{21}'}\psi_{21x} + T_{11}\psi_{11y0}\omega_{01};$$

$$(T_{11}p+1)\psi_{11y} = T_{11}U_{11y} + \frac{L_{01}}{L_{21}'}\psi_{21y} - T_{11}\psi_{11x0}\omega_{01};$$

$$(T_{21}p+1)\psi_{21x} = \frac{L_{01}}{L_{11}}\psi_{11x} + T_{21}\psi_{21y0}(\omega_{01} - \omega_{1});$$

$$(T_{21}p+1)\psi_{21y} = \frac{L_{01}}{L_{11}}\psi_{11y} - T_{21}\psi_{21x0}(\omega_{01} - \omega_{1});$$

$$M_{\partial 1} = \frac{3Z_{n1}L_{01}}{2\Delta_{1}} \left(\psi_{11y0}\psi_{21x} - \psi_{11x0}\psi_{21y}\right)$$

$$M_{\partial 1} - \left(J_{\partial 1} + \frac{J_{\partial 1}}{i_{p1}^{2}}\right)p^{2}\varphi_{1} = M_{c1};$$

$$U_{11x} = k_{U1}f_{11} + U_{01}; U_{11y} = k_{U1}f_{11} + U_{01};$$

$$\omega_{01} = \frac{2\pi f_{11}}{Z_{n1}}; \quad \omega_{1} = p\varphi_{1};$$

$$F_{x} = i_{\partial 1}i_{p1}M_{c1};$$

$$F_{x} - F_{n} - F_{mp} = mp^{2}S_{2};$$

$$\varphi_{1} = i_{p1}\varphi_{11}; \quad \varphi_{01} = i_{\partial 1}S_{1}.$$

$$(2.8)$$

Системе уравнений (2.8) соответствует следующая структурная схема электротехнического комплекса однобарабанного ленточного конвейера как объекта управления (рисунок 2.4). Она показывает все взаимосвязи в линеаризованной математической модели ленточного конвейера.

Однако, для поиска требуемых передаточных функций использование метода структурных преобразований весьма затруднительно из-за наличия большого количества перекрестных связей. Поэтому, воспользовавшись принципом суперпозиции, приравняем в системе уравнений (2.8) входные воздействия U_{01} , F_n и F_{mp} нулю. Выразим из первого и второго уравнений переменные ψ_{11x} и ψ_{11y} :

$$\Psi_{11x} = \frac{\left(k_{U1} + \frac{2\pi}{Z_{n1}}\Psi_{11y0}\right)T_{11}f_{11} + \frac{L_{01}}{L_{21}'}\Psi_{21x}}{T_{11}p + 1}; (2.9)$$



Рисунок 2.4 – Линеаризованная структурная схема электротехнического комплекса однобарабанного ленточного конвейера как объекта управления

$$\psi_{11y} = \frac{\left(k_{U1} - \frac{2\pi}{Z_{n1}}\psi_{11x0}\right)T_{11}f_{11} + \frac{L_{01}}{L_{21}'}\psi_{21y}}{T_{11}p + 1}.$$
(2.10)

Подставим формулы (2.9) и (2.10) в третье и четвертое уравнения системы (2.8) и выразим из последних потокосцепления ψ_{21x} и ψ_{21y} :

$$\psi_{21x} = \frac{\frac{L_{01}}{L_{11}} \left(k_{U1} + \frac{2\pi}{Z_{n1}} \psi_{11y0} \right) T_{11} + \frac{2\pi}{Z_{n1}} \psi_{21y0} T_{21} \left(T_{11}p + 1 \right)}{\left(T_{11}p + 1 \right) \left(T_{21}p + 1 \right) - \frac{L_{01}^2}{L_{11}L_{21}'}} ; \qquad (2.11)$$
$$- \frac{\psi_{21y0} T_{21} \left(T_{11}p + 1 \right)}{\left(T_{11}p + 1 \right) \left(T_{21}p + 1 \right) - \frac{L_{01}^2}{L_{11}L_{21}'}} \omega_1$$

$$\begin{split} \psi_{21y} &= \frac{\frac{L_{01}}{L_{11}} \left(k_{U1} - \frac{2\pi}{Z_{n1}} \psi_{11x0} \right) T_{11} - \frac{2\pi}{Z_{n1}} \psi_{21x0} T_{21} \left(T_{11} p + 1 \right)}{\left(T_{11} p + 1 \right) \left(T_{21} p + 1 \right) - \frac{L_{01}^2}{L_{11} L_{21}^2}} f_{11} + \frac{\psi_{21x0} T_{21} \left(T_{11} p + 1 \right)}{\left(T_{11} p + 1 \right) \left(T_{21} p + 1 \right) - \frac{L_{01}^2}{L_{11} L_{21}^2}} \omega_1 \end{split}$$

$$(2.12)$$

Подставляя (2.11) и (2.12) в пятое уравнение системы (2.8) и избавляясь аналогичным образом от всех промежуточных переменных, найдем уравнение, связывающее перемещение x_2 с частотой питающего напряжения f_{11} .

$$\begin{cases}
mp \left[(T_{11}p+1)(T_{21}p+1) - \frac{L_{01}^2}{L_{11}L_{21}'} \right] (T_{\pi}p+1) + \\
+ i_{\delta 1}^2 i_{p1}^2 \left(J_{\delta 1} + \frac{J_{\delta 1}}{i_{p1}^2} \right) \left(\frac{m}{C_{\pi}} p^2 + T_{\pi}p+1 \right) \left[(T_{11}p+1)(T_{21}p+1) - \frac{L_{01}^2}{L_{11}L_{21}'} \right] + \\
+ \frac{3Z_{n1}L_{01}i_{\delta 1}^2 i_{p1}^2}{2\Delta_1} \left(\psi_{11x0}\psi_{21x0} + \psi_{11y0}\psi_{21y0} \right) T_{21}(T_{11}p+1) \left(\frac{m}{C_{\pi}} p^2 + T_{\pi}p+1 \right) \right] p \\
= \frac{3Z_{n1}L_{01}i_{\delta 1}i_{p1}}{2\Delta_1} \left\{ \psi_{11y0} \left[\frac{L_{01}}{L_{11}} \left(k_{U1} + \frac{2\pi}{Z_{n1}}\psi_{11y0} \right) T_{11} + \frac{2\pi}{Z_{n1}}\psi_{21y0} T_{21}(T_{11}p+1) \right] - (2.13) \\
- \psi_{11x0} \left[\frac{L_{01}}{L_{11}} \left(k_{U1} - \frac{2\pi}{Z_{n1}}\psi_{11x0} \right) T_{11} - \frac{2\pi}{Z_{n1}}\psi_{21x0} T_{21}(T_{11}p+1) \right] \right\} f_{11}$$

При переходе к изображениям Лапласа из (2.13) следует первая искомая передаточная функция однобарабанного ленточного конвейера

$$W_{_{\mathcal{I}\mathcal{K}1}}(p) = \frac{S_2(p)}{f_{_{11}}(p)} = \frac{k_{_{\mathcal{I}\mathcal{K}1}}(b_0p^2 + b_1p + 1)}{\left(a_0p^5 + a_1p^4 + a_2p^3 + a_3p^2 + a_4p + 1\right)p},$$
(2.14)

где

$$\begin{aligned} \frac{2\pi}{Z_{n1}} \Big(\Psi_{11x0} \Psi_{21x0} + \Psi_{11y0} \Psi_{21y0} \Big) T_{21} + \\ k_{\pi\kappa 1} &= \frac{+\frac{L_{01}}{L_{11}} T_{11} \left[\Psi_{11y0} \Big(k_{U1} + \frac{2\pi}{Z_{n1}} \Psi_{11y0} \Big) - \Psi_{11x0} \Big(k_{U1} - \frac{2\pi}{Z_{n1}} \Psi_{11x0} \Big) \right]}{i_{\delta 1} i_{p1} \Big(\Psi_{11x0} \Psi_{21x0} + \Psi_{11y0} \Psi_{21y0} \Big) T_{21}}; \\ b_{0} &= \frac{\frac{2\pi}{Z_{n1}} \Big(\Psi_{11x0} \Psi_{21x0} + \Psi_{11y0} \Psi_{21y0} \Big) T_{11} T_{21} T_{\pi}}{\frac{2\pi}{Z_{n1}} \Big(\Psi_{11x0} \Psi_{21x0} + \Psi_{11y0} \Psi_{21y0} \Big) T_{21} + \frac{L_{01}}{Z_{n1}} T_{11} \left[\Psi_{11y0} \Big(k_{U1} + \frac{2\pi}{Z_{n1}} \Psi_{11y0} \Big) - \Psi_{11x0} \Big(k_{U1} - \frac{2\pi}{Z_{n1}} \Psi_{11x0} \Big) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{split} b_{1} &= T_{s} + \frac{\frac{2\pi}{Z_{sl}} \Big(\Psi_{11s0} \Psi_{21s0} + \Psi_{11y0} \Psi_{21y0} \Big) T_{1} T_{2l}}{\frac{2\pi}{Z_{sl}} \Big(\Psi_{11s0} \Psi_{21s0} + \Psi_{11y0} \Psi_{21y0} \Big) T_{21} + \\ &+ \frac{L_{01}}{L_{11}} T_{11} \Bigg[\Psi_{11y0} \Bigg(k_{U1} + \frac{2\pi}{Z_{sl}} \Psi_{11y0} \Bigg) - \Psi_{11s0} \Bigg(k_{U1} - \frac{2\pi}{Z_{sl}} \Psi_{11s0} \Bigg) \Bigg] \\ a_{0} &= \frac{m \Bigg(J_{sl} + \frac{J_{sl}}{i_{p1}^{2}} \Bigg) T_{11}}{\frac{3Z_{sl}L_{0l}C_{s}}{2\Delta_{1}} \Big(\Psi_{11s0} \Psi_{21s0} + \Psi_{11y0} \Psi_{21y0} \Big)}; \\ a_{1} &= \frac{\left[\frac{\frac{m}{i_{sl}^{2}t_{p1}^{2}} + \left(J_{ol} + \frac{J_{ol}}{i_{p1}^{2}} \right) \right] T_{11}T_{2l}T_{s}}{2\Delta_{1}} + \frac{m \Bigg(J_{ol} + \frac{J_{o1}}{i_{p1}^{2}} \Bigg) \Big(T_{11} + T_{21} \Big)}{C_{s}}; \\ a_{2} &= \frac{mT_{11}}{C_{s}} + \left[\frac{\frac{m}{i_{sl}^{2}t_{p1}^{2}} + \left(J_{ol} + \frac{J_{o1}}{i_{p1}^{2}} \right) \right] \Big[T_{11}T_{21}T_{s} + \left(T_{11} + T_{21} \right) T_{s} \right] + \frac{m \Bigg(J_{ol} + \frac{J_{o1}}{i_{p1}^{2}} \Bigg) \Big(1 - \frac{L_{01}^{2}}{L_{11}L_{21}} \Big)}{C_{s}}; \\ a_{3} &= \frac{mT_{11}}{C_{s}} + \left[\frac{\frac{m}{i_{sl}^{2}t_{p1}^{2}} + \left(J_{ol} + \frac{J_{o1}}{i_{p1}^{2}} \right) \right] \Big[T_{11}T_{21} + (T_{11} + T_{21}) T_{s} \right] + \frac{m \Bigg(J_{ol} + \frac{J_{o1}}{i_{p1}^{2}} \Bigg) \Big(1 - \frac{L_{01}^{2}}{L_{11}L_{21}} \Big)}{C_{s}}; \\ a_{4} &= T_{11}T_{s} + \frac{\left[\frac{m}{i_{sl}^{2}t_{p1}^{2}} + \left(J_{ol} + \frac{J_{o1}}{i_{p1}^{2}} \right) \right] \Big[T_{11}T_{21} + (T_{11} + T_{21}) T_{s} \Big] + \frac{T_{sl}}{L_{11}L_{21}} \Big(1 - \frac{L_{01}^{2}}{L_{11}L_{21}} \Big)}{C_{s}}; \\ a_{4} &= T_{11} + T_{s} + \frac{\left[\frac{m}{i_{sl}^{2}t_{p1}^{2}} + \left(J_{ol} + \frac{J_{o1}}{i_{p1}^{2}} \right) \right] \Big[1 - \frac{L_{01}^{2}}{L_{11}L_{21}} \Big]}{2\Delta_{1}} \Big] \Big[1 - \frac{L_{01}^{2}}{L_{11}U_{21}} \Big] \\ a_{4} &= T_{11} + T_{s} + \frac{\left[\frac{m}{i_{sl}^{2}t_{p1}^{2}} + \left(J_{ol} + \frac{J_{o1}}{i_{p1}^{2}} \right) \right] \Big[1 - \frac{L_{01}^{2}}{L_{11}L_{21}} \Big]}{2\Delta_{1}} \Big] \\ \end{array}$$

Следовательно, если за выходную координату взять перемещение S_2 груза в районе контрприводного барабана, ленточный конвейер с асинхронным исполнительным двигателем можно приближенно описать динамическим звеном шестого порядка.

Передаточную функцию однобарабанного конвейера, связывающую скорость V_2 движения ленты и груза в районе контрприводного барабана с частотой f_{11} питающего напряжения можно получить непосредственно из формулы (2.14)

$$W_{_{\mathcal{IK}2}}(p) = \frac{V_2(p)}{f_{11}(p)} = \frac{k_{_{\mathcal{IK}1}}(b_0p^2 + b_1p + 1)}{a_0p^5 + a_1p^4 + a_2p^3 + a_3p^2 + a_4p + 1},$$
(2.15)

Для определения передаточной функции ленточного конвейера по отношению к изменению силы F_n (или F_{mp}) опять применим принцип суперпозиции и приравняем нулю воздействия U_{01} , f_{11} и F_{mp} . Из первого и второго уравнений системы (2.8) следует, что в этом случае

$$\psi_{11x} = \frac{\frac{L_{01}}{L_{21}'} \psi_{21x}}{T_{11}p + 1};$$
(2.16)

$$\psi_{11y} = \frac{\frac{L_{01}}{L_{21}'} \psi_{21y}}{T_{11}p + 1}.$$
(2.17)

Подставим формулы (2.16) и (2.17) в третье и четвертое уравнения системы (2.8) и выразим из последних потокосцепления Ψ_{21x} и Ψ_{21y} :

$$\psi_{21x} = -\frac{\psi_{21y0}T_{21}(T_{11}p+1)}{(T_{11}p+1)(T_{21}p+1) - \frac{L_{01}^2}{L_{11}L_{21}'}}\omega_1; \qquad (2.18)$$

$$\psi_{21y} = \frac{\psi_{21x0}T_{21}(T_{11}p+1)}{(T_{11}p+1)(T_{21}p+1) - \frac{L_{01}^2}{L_{11}L_{21}'}}\omega_1.$$
(2.19)

Подставляя формулы (2.18) и (2.19) в пятое уравнение системы (2.8) и избавляясь от всех промежуточных переменных, найдем уравнение, связывающее перемещение S₂ с силой F_n .

$$-C_{s}\left\{mp\left[(T_{11}p+1)(T_{21}p+1)-\frac{L_{01}^{2}}{L_{11}L_{21}^{\prime}}\right](T_{s}p+1)+\right.\\+i_{\delta 1}^{2}i_{p1}^{2}\left(J_{\delta 1}+\frac{J_{\delta 1}}{i_{p1}^{2}}\right)\left(\frac{m}{C_{s}}p^{2}+T_{s}p+1\right)\left[(T_{11}p+1)(T_{21}p+1)-\frac{L_{01}^{2}}{L_{11}L_{21}^{\prime}}\right]+\\\left.+\frac{3Z_{n1}L_{01}i_{\delta 1}^{2}i_{p1}^{2}}{2\Delta_{1}}\left(\Psi_{11x0}\Psi_{21x0}+\Psi_{11y0}\Psi_{21y0}\right)T_{21}(T_{11}p+1)\left(\frac{m}{C_{s}}p^{2}+T_{s}p+1\right)\right]p}{(T_{s}p+1)}x_{2}=\\\left\{C_{s}(T_{s}p+1)\left[(T_{11}p+1)(T_{21}p+1)-\frac{L_{01}^{2}}{L_{11}L_{21}^{\prime}}\right]+\right.\\\left.+i_{\delta 1}^{2}i_{p1}^{2}\left(J_{\delta 1}+\frac{J_{\delta 1}}{i_{p1}^{2}}\right)p^{2}\left[(T_{11}p+1)(T_{21}p+1)-\frac{L_{01}^{2}}{L_{11}L_{21}^{\prime}}\right]+\right.\\\left.+\frac{3Z_{n1}L_{01}i_{\delta 1}^{2}i_{p1}^{2}}{2\Delta_{1}}\left(\Psi_{11x0}\Psi_{21x0}+\Psi_{11y0}\Psi_{21y0}\right)T_{21}(T_{11}p+1)p\right]F_{n}$$

$$(2.20)$$

Из уравнения (2.20) следует, что третья интересующая нас передаточная функция однобарабанного ленточного конвейера будет равна

$$W_{_{\mathcal{I}\mathcal{K}3}}(p) = \frac{S_2(p)}{F_n(p)} = -\frac{k_{_{\mathcal{I}\mathcal{K}2}}(b_{01}p^4 + b_{11}p^3 + b_{21}p^2 + b_{31}p + 1)}{(a_0p^5 + a_1p^4 + a_2p^3 + a_3p^2 + a_4p + 1)p},$$
(2.21)

$$k_{\pi\kappa^{2}} = \frac{1 - \frac{L_{0}^{2}}{L_{1}L_{2}^{\prime}}}{\frac{3Z_{n1}L_{01}i_{\delta 1}^{2}i_{p1}^{2}}{2\Delta_{1}} (\Psi_{11x0}\Psi_{21x0} + \Psi_{11y0}\Psi_{21y0})T_{21}};$$

$$b_{01} = \frac{i_{\delta 1}^{2}i_{p1}^{2} (J_{01} + \frac{J_{\delta 1}}{i_{p1}^{2}})T_{11}T_{21}}{C_{\pi} \left(1 - \frac{L_{0}^{2}}{L_{1}L_{2}^{\prime}}\right)};$$

где

$$b_{11} = \frac{C_{\pi}T_{11}T_{21}T_{\pi} + i_{\delta 1}^{2}i_{p1}^{2}\left(J_{\partial 1} + \frac{J_{\delta 1}}{i_{p1}^{2}}\right)\left(T_{11} + T_{21}\right)}{C_{\pi}\left(1 - \frac{L_{0}^{2}}{L_{1}L_{2}^{\prime}}\right)};$$

$$b_{21} = \frac{C_{n} \Big[\Big(T_{11} + T_{21} \Big) T_{n} + T_{11} T_{21} \Big] +}{C_{n} \Big[\Big(J_{\partial 1} + \frac{J_{\partial 1}}{i_{p1}^{2}} \Big) \Big(1 - \frac{L_{0}^{2}}{L_{1} L_{2}^{\prime}} \Big) + \frac{3Z_{n1}L_{01}}{2\Delta_{1}} \Big(\Psi_{11x0} \Psi_{21x0} + \Psi_{11y0} \Psi_{21y0} \Big) T_{11} T_{21} \Big]}{C_{n} \Big(1 - \frac{L_{0}^{2}}{L_{1} L_{2}^{\prime}} \Big)};$$

$$b_{31} = \frac{C_{n} \Big[T_{11} + T_{21} + T_{n} \Big(1 - \frac{L_{0}^{2}}{L_{1} L_{2}^{\prime}} \Big) \Big] + i_{\partial 1}^{2} i_{p1}^{2} \frac{3Z_{n1}L_{01}}{2\Delta_{1}} \Big(\Psi_{11x0} \Psi_{21x0} + \Psi_{11y0} \Psi_{21y0} \Big) T_{21}}{C_{n} \Big(1 - \frac{L_{0}^{2}}{L_{1} L_{2}^{\prime}} \Big)}.$$

Из формулы (2.21) с очевидностью вытекает, что четвертая искомая передаточная функция, связывающая изменение скорости V_2 при вариации силы F_n , будет равна

$$W_{_{\pi\kappa4}}(p) = \frac{V_2(p)}{F_n(p)} = -\frac{k_{_{\pi\kappa2}}(b_{01}p^4 + b_{11}p^3 + b_{21}p^2 + b_{31}p + 1)}{a_0p^5 + a_1p^4 + a_2p^3 + a_3p^2 + a_4p + 1}.$$
 (2.22)

2.3 Компьютерное моделирование электротехнического комплекса однобарабанного ленточного конвейера с асинхронным исполнительным двигателем и оценка адекватности полученных передаточных функций

Для оценки адекватности полученных передаточных функций создадим компьютерную модель однобарабанного ленточного конвейера модели TNG1200, предназначенного для транспортировки мела. Рассматриваемый конвейер имеет следующие технические характеристики: производительность 425 т/час; межосевой расстояние между приводным и контрприводным барабанами 167,1 м; ширина ленты 1200 мм; скорость ленты 1,45 м/с; диаметр приводного барабана 630 мм; передаточное отношение редуктора $i_{p1} = 33,7$. Конвейер приводится в движение асинхронным двигателем BG315S4 с номинальной мощностью 110 кВт и синхронной скоростью 1500 об/мин и номинальным фазным напряжением 220 В.

Расчетная модель электротехнического комплекса ленточного конвейера модели TNG1200, разработанная для программной среды Matlab Simulink [32, 80, 91, 92] в соответствии с его техническими характеристиками, представлена на рисунке 2.5.

При расчетах приняты следующие параметры схемы замещения асинхронного двигателя:

 $L_{11} = 0,0174$ Гн; $R_{11} = 0,0244$ Ом; $L'_{21} = 0,0175$ Гн; $R'_{21} = 0,0197$ Ом; $L_{01} = 0,017$ Гн; $T_{11} = 0,0379$ с; $T_{21} = 0,0473$ с.



Рисунок 2.5 – Расчетная модель электротехнического комплекса ленточного конвейера модели TNG1200

Расчетная модель позволяет построить график изменения перемещения *S*² ленточного конвейера в районе контрбарабана при запуске асинхронного двигателя на номинальной частоте (рисунок 2.6). При этом в момент времени 2 секунды происходит увеличение заданной частоты на 1 Гц.



Рисунок 2.6 – График перемещения *S*₂, построенный с помощью нелинейной модели, набранной в программе Matlab Simulink

График перемещения S_2 ленты конвейера при частоте питающего напряжения $f_{11} = 51$ Гц представлен на рисунке 2.7. Он показывает, что за 2 секунды лента в районе контрбарабана переместится на 2,9747 м.



Рисунок 2.7 – График перемещения S_2 на частоте питающего напряжения $f_{11} = 51 \, \, \Gamma \mathrm{u}$

Фиксировалось также растяжение транспортной ленты в процессе запуска, которое характеризуется разностью перемещений S_1 - S_2 (рисунок 2.8). Полученный график показывает, что лента растягивается плавно по мере увеличения скорости исполнительного двигателя. Расчетная модель позволяет также исследовать изменение скорости V_2 движения транспортной ленты и груза в районе контрбарабана при запуске двигателя (рисунок 2.9). Интерес также представляет изменение скорости V_2 при малых изменениях частоты f_{11} (рисунок 2.10). Анализ графика переходного процесса в «малом» показывает, что на начальной частоте $f_{110} = 50$ Гц время переходного процесса, показывающий изменение скорости V_2 при набросе силы F_n на 1000 Н (рисунок 2.11). Динамический провал скорости при этом составляет 0,012 м/с.



Рисунок 2.8 – График разности перемещений S₁- S₂



Рисунок 2.9 – График скорости движения V₂ ленточного конвейера при запуске асинхронного двигателя на номинальной частоте и подаче приращения частоты на 1 Гц



Рисунок 2.10 – График переходного процесса скорости движения V₂ ленточного конвейера при подаче приращения частоты на 1 Гц, построенный с помощью нелинейной модели



Рисунок 2.11– График переходного процесса скорости движения V₂ ленточного конвейера при набросе силы *F_n* на 1000 Н

Расчетная модель, приведенная на рисунке 2.5, позволяет также определить начальные условия потокосцеплений, необходимые для расчета коэффициентов передаточных функций ленточного конвейера. Результаты моделирования показывают, что при $f_{110} = 50$ Гц наблюдаются следующие начальные условия: $\psi_{1x0} = 1,401$ Вс, $\psi_{1y0} = -1,376$ Вс, $\psi_{2x0} = 1,314$ и $\psi_{2y0} = 1,394$. Подставляя эти значения в формулы (2.14), (2.15), (2.21) и (2.22) с учетом параметров схемы замещения асинхронный двигателя BG315S4 и технических характеристик ленточного конвейера TNG1200, получим численные значения его передаточных функций:

$$W_{\pi\pi1}(p) = \frac{s_2(p)}{f_{11}(p)} = \frac{0,0292(0,0126p^2 + 0,3688p + 1)}{(0,0000085872p^5 + 0,000046019p^4 + 0,0031419p^3 + 0,0484p^2 + 0,369p + 1)p}, \quad (2.23)$$

$$W_{\pi\kappa^{2}}(p) = \frac{V_{2}(p)}{f_{11}(p)} = \frac{0,0292(0,0126p^{2}+0,3688p+1)}{0,0000085872p^{5}+0,000046019p^{4}+0,0031419p^{3}+}, (2.24) +0,0484p^{2}+0,369p+1 W_{\pi\kappa^{3}}(p) = \frac{s_{2}(p)}{F_{n}(p)} = -\frac{+604,073p+1)}{(0,0000085872p^{5}+0,000046019p^{4}+0,0031419p^{3}+)} +0,0484p^{2}+0,369p+1)p , (2.25) \\ 8,3\cdot10^{-9}(0,006894p^{4}+0,3391p^{3}+23,5636p^{2}+0,000046019p^{4}+0,0031419p^{3}+), (2.26) \\ +0,0484p^{2}+0,369p+1 \end{pmatrix}$$

Моделирование в программе Matlab Simulink передаточной функции (2.24) позволяет построить график переходного процесса скорости V_2 рассматриваемого ленточного конвейера в «малом» с помощью полученной линеаризованной модели (рисунки 2.12 и 2.13).



Рисунок 2.12 – Расчетная линейная модель ленточного конвейера в соответствии с передаточной функцией (2.24)



Рисунок 2.13 – График переходного процесса скорости движения V₂ ленточного конвейера при подаче приращения частоты на 1 Гц, построенный с помощью передаточной функции (2.24)

Анализ графика показывает, что время переходного процесса скорости составляет $t_{nn} = 0,782$ с, то есть расхождение с результатом, полученным с помощью нелинейной модели, не превышает 0,26 %.

Моделирование передаточной функции (2.23) (рисунок 2.14) позволяет построить график переходного процесса перемещения при подаче частоты питающего напряжения $f_{11} = 51$ Гц (рисунок 2.15).



Рисунок 2.14 – Расчетная линейная модель ленточного конвейера в соответствии



Рисунок 2.15 – График перемещения S₂, построенный с помощью передаточной функции (2.23)

Он показывает, что за 2 секунды лента конвейера переместится на 2,9781 м, и, следовательно, расхождение с аналогичным результатом, полученным с помощью нелинейной модели составляет 0,11 %.

Построен также по передаточной функции (2.26) график переходного процесса скорости V_2 при набросе силы F_n на 1000 Н (рисунки 2.16 и 2.17), который показывает, что динамический провал равен 0,0119 м/с. Сравнение этого результата с аналогичным показателем, полученным с помощью нелинейной модели, позволяет сделать вывод, что расхождение не превышает 0,83 %.



Рисунок 2.16 – Расчетная линейная модель ленточного конвейера в соответствии с передаточной функцией (2.26)



Рисунок 2.17 – График переходного процесса скорости движения V₂ ленточного конвейера при набросе силы *F_n* на 1000 H, построенный по передаточной функции (2.26)

Следовательно, разработанная линеаризованная математическая модель электротехнического комплекса однобарабанного ленточного конвейера обладает достаточной точностью и может быть применена при синтезе системы управления этим комплексом. Необходимость создания таких систем вызвана необходимость повышения энергетической эффективности ленточных конвейеров за счет регулирования скорости. Однако, при торможениях приводного барабана в транспортной ленте возникают колебания (рисунок 2.18 и 2.19), снижающие ресурс ее работы.



Рисунок 2.18 – График скорости движения V₂ ленточного конвейера при запуске асинхронного двигателя и при торможения до требуемого режима работы



Рисунок 2.19 – График изменения растяжения транспортной ленты при торможении

2.4 Математическая модель электротехнического комплекса двухбарабанного ленточного конвейера с асинхронными исполнительными двигателями

Среди большого множества конструктивных решений встречаются ленточные конвейеры с двумя разнесенными приводными барабанами с асинхронными исполнительными двигателями [56,93-95,102] (рисунок 2.20).







Рисунок 2.20 – Упрощенная кинематическая схема двухбарабанного ленточного конвейера с разнесенными приводными барабанами

Рассмотрим математическую модель электротехнического комплекса двухбарабанного конвейера, поскольку вероятность возникновения колебаний в упругой системе транспортной ленты в нем гораздо выше, чем в однобарабанном.

Расчетную схему кинематической цепи рассматриваемого ленточного конвейера можно представить следующим образом (рисунок 2.21). Она составлена при тех же допущениях, что приведены выше, однако расчетная схема транспортной ленты взята симметричной [62,85,91,104].



Рисунок 2.21 – Упрощенная расчетная схема кинематической цепи двухбарабанного ленточного конвейера

На расчетной схеме введены следующие дополнительные обозначения: $J_{\partial 2}$ – момент инерции ротора второго асинхронного двигателя; $J_{\delta 2}$ – момент инерции второго приводного барабана; ϕ_2 – угол поворота ротора второго двигателя; i_{p2} с – с коэффициент передачи второго редуктора; ϕ_{22} – угол поворота второго барабана; S_2 – перемещение ленты при сходе со второго приводного барабана.

Расчетная схема позволяет составить уравнения движения двухбарабанного ленточного конвейера совместно с асинхронными исполнительными двигателями. Дополним систему (2.1) уравнениями второго асинхронного двигателя и редуктора, и при этом учтем, что инерция движущихся и вращающихся делится между двумя двигателями, также, как и нагрузка.

$$\begin{split} \frac{d\psi_{11x}}{dt} &= U_{11x} - \frac{R_{11}L'_{21}}{\Delta_1}\psi_{11x} + \frac{R_{11}L_{01}}{\Delta_1}\psi_{21x} + \omega_{01}\psi_{11y}; \\ \frac{d\psi_{11y}}{dt} &= U_{11y} - \frac{R_{11}L'_{21}}{\Delta_1}\psi_{11y} + \frac{R_{11}L_{01}}{\Delta_1}\psi_{21y} - \omega_{01}\psi_{11x}; \\ \frac{d\psi_{21x}}{dt} &= -\frac{R'_{21}L_{11}}{\Delta_1}\psi_{21y} + \frac{R'_{21}L_{01}}{\Delta_1}\psi_{11x} + (\omega_{01} - \omega_1)\psi_{21x}; \\ \frac{d\psi_{21y}}{dt} &= -\frac{R'_{21}L_{11}}{\Delta_1}\psi_{21y} + \frac{R'_{21}L_{01}}{\Delta_1}\psi_{11y} - (\omega_{01} - \omega_1)\psi_{21x}; \\ \frac{3Z_{a1}L_{01}}{2\Delta_1}(\psi_{11y}\psi_{21x} - \psi_{11x}\psi_{21y}) - \left(J_{a1} + \frac{J_{a1}}{l_{a1}}\right)\frac{d^2\varphi_1}{dt^2} = M_{c1}; \\ U_{11x} &= k_{u1}f_{11} + U_{01}; U_{11y} = k_{u1}f_{11} + U_{01}; \\ \omega_{01} &= \frac{2\pi f_{11}}{Z_{a1}}; \quad \omega_1 = \frac{d\varphi_1}{dt}; \\ \frac{d\psi_{12y}}{dt} &= U_{12y} - \frac{R_{12}L'_{22}}{\Delta_2}\psi_{12y} + \frac{R_{12}L_{02}}{\Delta_2}\psi_{22y} - \omega_{02}\psi_{12x}; \\ \frac{d\psi_{12y}}{dt} &= U_{12y} - \frac{R_{12}L'_{22}}{\Delta_2}\psi_{12y} + \frac{R'_{12}L_{02}}{\Delta_2}\psi_{22y} - \omega_{02}\psi_{12x}; \\ \frac{d\psi_{22x}}{dt} &= -\frac{R'_{22}L_{12}}{\Delta_2}\psi_{22y} + \frac{R'_{22}L_{02}}{\Delta_2}\psi_{12y} - (\omega_{02} - \omega_2)\psi_{22x}; \\ \frac{d\psi_{22y}}{dt} &= -\frac{R'_{22}L_{12}}{\Delta_2}\psi_{22y} - \frac{R'_{22}L_{02}}{\Delta_2}\psi_{12y} - (\omega_{02} - \omega_2)\psi_{22x}; \\ \frac{d\psi_{22y}}{dt} &= -\frac{R'_{22}L_{12}}{\Delta_2}\psi_{22y} - \frac{K'_{22}L_{02}}{\Delta_2}\psi_{12y} - (\omega_{02} - \omega_2)\psi_{22x}; \\ \frac{d\psi_{22x}}{dt} &= -\frac{R'_{22}L_{12}}{\Delta_2}\psi_{22y} + \frac{R'_{22}L_{02}}{\Delta_2}\psi_{12y} - (\omega_{02} - \omega_2)\psi_{22x}; \\ \frac{d\psi_{22y}}{dt} &= -\frac{R'_{22}L_{12}}{\Delta_2}\psi_{22y} - \psi_{12x}\psi_{22y} - \left(\int_{a_2} + \frac{J_{a_2}}{d_2}\right)\frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = M_{c2}; \\ U_{12x} &= k_{u1}f_{12} + U_{02}; U_{12y} = k_{u1}f_{12} + U_{02}; \\ \omega_{02} &= \frac{2\pi f_{12}}{Z_{22}}; \quad \omega_2 &= \frac{d\psi_2}{d_2}; \\ U_{12x} &= k_{u1}f_{u2} + U_{u2}; U_{12y} = k_{u1}f_{u2} + U_{u2}; \\ \omega_{02} &= \frac{2\pi f_{12}}{Z_{a2}}; \quad \omega_2 &= \frac{d\psi_2}{d_1}; \\ F_{a1} &= F_{a2} - F_{a} - F_{ay} = \frac{d}{a}\frac{d^2S_1}{d^2} + \frac{m}{2}\frac{d^2S_2}{d^2}; \\ F_{a1} + F_{a2} - F_{a} - F_{ay} = \frac{m}{2}\frac{d^2S_1}{d^2} + \frac{m}{2}\frac{d^2S_2}{d^2}; \\ \psi_{12} &= i_{ay}\psi_{1}; \\ \psi_{11} &= i_{a}S_1; \\ \psi_{12} &= i_{ay}\varphi_{1}; \\ \psi_{12} &= i_{a}S_1; \\ \psi_{12} &= i_{ay}\varphi_{1}; \\ \psi_{12} &= i_{a}S_1; \\ \psi_{12} &= i_{ay}\varphi_{1}; \\ \psi_{12} &= i_{a}S_1;$$

(2.27)

где ψ_{12x} , ψ_{12y} , U_{12x} , U_{12y} , ψ_{22x} , ψ_{22y} , L_{12} , R_{12} , L'_{22} , R'_{22} , L_{02} , ω_2 , Z_{n2} , M_{c2} , $\Delta_2 = L_{12}L'_{22} - L^2_{02}$, f_{12} и U_{02} имеют то же смысловое значение, описанное ранее, но относятся ко второму асинхронному двигателю; F_{n1} – сила, прикладываемая от первого барабана к транспортной ленте; F_{n2} – сила, прикладываемая от первого барабана к транспортной ленте.

В соответствии с системой уравнений (2.27) составлена укрупненная структурная схема электротехнического комплекса двухбарабанного конвейера (рисунок 2.22). Она содержит блоки АД1 и АД2, причем блок АД1 содержит уравнения асинхронного двигателя первого барабана

$$\frac{d\Psi_{11x}}{dt} = U_{11x} - \frac{R_{11}L_{21}'}{\Delta_1}\Psi_{11x} + \frac{R_{11}L_{01}}{\Delta_1}\Psi_{21x} + \omega_{01}\Psi_{11y};$$

$$\frac{d\Psi_{11y}}{dt} = U_{11y} - \frac{R_{11}L_{21}'}{\Delta_1}\Psi_{11y} + \frac{R_{11}L_{01}}{\Delta_1}\Psi_{21y} - \omega_{01}\Psi_{11x};$$

$$\frac{d\Psi_{21x}}{dt} = -\frac{R_{21}'L_{11}}{\Delta_1}\Psi_{21x} + \frac{R_{21}'L_{01}}{\Delta_1}\Psi_{11x} + (\omega_{01} - \omega_1)\Psi_{21y};$$

$$\frac{d\Psi_{21y}}{dt} = -\frac{R_{21}'L_{11}}{\Delta_1}\Psi_{21y} + \frac{R_{21}'L_{01}}{\Delta_1}\Psi_{11y} - (\omega_{01} - \omega_1)\Psi_{21x};$$

$$M_{\partial 1} = \frac{3Z_{n1}L_{01}}{2\Delta_1}(\Psi_{11y}\Psi_{21x} - \Psi_{11x}\Psi_{21y});$$

$$U_{11x} = k_{U1}f_{11} + U_{01}; U_{11y} = k_{U1}f_{11} + U_{01}; \omega_{01} = \frac{2\pi f_{11}}{Z_{n1}}.$$
(2.28)

За входные координаты блока АД1 приняты частота питающего напряжения f_{11} и скорость вращения ротора первого двигателя \mathcal{O}_1 , а за выходную – электромагнитный момент $M_{\partial 1}$. Блок АД2 по аналогии содержит уравнения асинхронного двигателя второго барабана.



Рисунок 2.22 – Структурная схема электротехнического комплекса двухбарабанного ленточного конвейера как объекта управления

$$\frac{d\psi_{12x}}{dt} = U_{12x} - \frac{R_{12}L_{22}'}{\Delta_2}\psi_{12x} + \frac{R_{12}L_{02}}{\Delta_2}\psi_{22x} + \omega_{02}\psi_{12y};$$

$$\frac{d\psi_{12y}}{dt} = U_{12y} - \frac{R_{12}L_{22}'}{\Delta_2}\psi_{12y} + \frac{R_{12}L_{02}}{\Delta_2}\psi_{22y} - \omega_{02}\psi_{12x};$$

$$\frac{d\psi_{22x}}{dt} = -\frac{R_{22}'L_{12}}{\Delta_2}\psi_{22x} + \frac{R_{22}'L_{02}}{\Delta_2}\psi_{12x} + (\omega_{02} - \omega_2)\psi_{22y};$$

$$\frac{d\psi_{22y}}{dt} = -\frac{R_{22}'L_{12}}{\Delta_2}\psi_{22y} + \frac{R_{22}'L_{02}}{\Delta_2}\psi_{12y} - (\omega_{02} - \omega_2)\psi_{22x};$$

$$M_{\partial 2} = \frac{3Z_{n2}L_{02}}{2\Delta_2}(\psi_{12y}\psi_{22x} - \psi_{12x}\psi_{22y});$$

$$U_{12x} = k_{U1}f_{12} + U_{02}; U_{12y} = k_{U1}f_{12} + U_{02}; \omega_{02} = \frac{2\pi f_{12}}{Z_{n2}}.$$
(2.29)

За входные координаты блока АД2 приняты частота питающего напряжения f_{12} и скорость вращения ротора первого двигателя \mathcal{O}_2 , а за выходную – электромагнитный момент $M_{\partial 2}$. Все остальные блоки характеризуют движение транспортной ленты с грузом и взаимовлияние двигателей и ленты друг на друга.

Система уравнений (2.27) является сложной, поэтому целесообразно при анализе функционирования электротехнического комплекса двухбарабанного ленточного конвейера пользоваться численными методами решения и компьютерным моделированием.

2.5 Компьютерное моделирование электротехнического комплекса двухбарабанного ленточного конвейера с асинхронными исполнительными двигателями

Примером ленточного конвейера с приводом на возвратной станции может служить конвейер модели DPT1600 с пятью асинхронными двигателями мощностью 500 кВт, причем 3 двигателя установлены на приводной станции с тремя барабанами, а 2 – на возвратной станции (контрбарабане). Конвейер DPT1600 предназначен для транспортировки грузов на расстояние свыше 3500 м.

Кинематика ленточного конвейера такого сложна, поэтому ЛЛЯ компьютерного моделирования процессов, протекающих в двухбарабанных конвейером. ленточных конвейерах, воспользуемся гипотетическим Предположим, что гипотетический конвейер имеет характеристики, подобные TNG1200, но при этом приводится в движение двумя асинхронными двигателями мощностью 55 кВт. Один двигатель с редуктором установлен на приводном барабане, а второй с аналогичным редуктором – на контрбарабане (на возвратной станции).

Рассмотрим в качестве исполнительных двигатели АИР225М4 с синхронной скоростью 1500 об/мин и номинальным фазным напряжением 220 В. В соответствии с техническими характеристиками рассматриваемых двигателей разработана расчетная модель двухбарабанного ленточного конвейера для программы Matlab Simulink (рисунок 2.23). При этом расчетная модель каждого исполнительного двигателя выглядит следующим образом (рисунок 2.24). Она учитывает параметры схемы замещения двигателя, которые равны: $L_{11} = L_{12} = 0,0297$ Гн; $R_{11} = R_{12} = 0,0575$ Ом; $L'_{21} = L'_{22} = 0,03$ Гн; $R'_{21} = R'_{22} = 0,0313$ Ом; $L_{01} = L_{02} = 0,0291$ Гн; $T_{11} = T_{12} = 0,0258$ с; $T_{21} = T_{22} = 0,048$ с;



Рисунок 2.23 – Расчетная модель электротехнического комплекса двухбарабанного ленточного конвейера



Рисунок 2.24 – Расчетная модель каждого исполнительного двигателя

Разработанная расчетная модель двухбарабанного ленточного конвейера позволяет построить график изменения растяжения транспортной ленты при вариации скорости одного из двигателей (рисунок 2.25). Он наглядно показывает, что нестабильность скорости и, следовательно, несинхронность вращения роторов двигателей приводит к колебательным процессам собственно в транспортной ленте, что снижает ресурс ее работы. Размах колебаний составляет порядка 0,01 м при длине конвейера 167 м.

66



Рисунок 2.25 – График изменения растяжения транспортной ленты при вариации скорости одного из двигптелей

Также при несинхронности вращения исполнительных двигателей происходит усиленный износ транспортной ленты и в двухбарабанных конвейерах, у которых приводные барабаны расположены на одном конце конвейера. В этом случае износ вызван пробуксовкой одного из барабанов относительно ленты.

Полученные результаты убедительно показывают разработке при электротехнического комплекса ленточного конвейера необходимо управлять асинхронными двигателями таким образом, чтобы уменьшить амплитуды колебаний В процессах растяжения И сжатия ленты или исключить проскальзывание барабанов относительно ленты.

2.6 Выводы по второй главе

1. Разработана математическая модель однобарабанного ленточного конвейера, учитывающая влияние упругих и диссипативных сил в транспортной ленте на работу асинхронного двигателя.

2. Получены передаточные функции однобарабанного ленточного конвейера, учитывающие взаимовлияние процессов, протекающих в асинхронном двигателе и транспортной ленте, и позволяющие корректно синтезировать систему управления электротехническим комплексом конвейера.

3. Разработаны расчетные модели однобарабанного ленточного конвейера и исследованы процессы, протекающие при его работе в переходных режимах.

4. Разработана математическая модель двухбарабанного ленточного конвейера, учитывающая взаимовлияние асинхронных двигателей друг на друга за счет кинематической связи посредством упругой транспортной ленты.

5. Показано, что несинхронность вращения асинхронных двигателей приводит к колебательным процессам в транспортной ленте, приводящим к снижению ресурса работы.

З СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

3.1 Критерии синтеза системы управления электротехническим комплексом ленточного конвейера

Электротехнический комплекс ленточного конвейера, как показано выше, представляет собой нелинейный и нестационарный объект. Нелинейность вызваны переменных математической прежде всего перемножением В модели исполнительных асинхронных двигателей, а также нелинейным характером сил трения транспортной ленты о приводные барабаны и опорные ролики. Нестационарность объекта переменной характеризуется величиной перемещаемого груза, что приводит к изменению инерционности движущихся масс и сил, действующих на электротехнический комплекс конвейера.

Другой отличительной чертой конвейера является наличие упругодиссипативных сил в транспортной ленте, которые могут привести к возникновению колебательных процессов сжатия и растяжения, что ускоряет износ ленты. Кроме того, колебательные явления непосредственно воздействуют на исполнительные двигатели электротехнического комплекса ленточного конвейера.

Для увеличения энергетической эффективности конвейера необходимо регулировать скорость его движения, поскольку скорость загрузки транспортируемым материалом может меняться [12,13,21,40,44,82-84]. Поэтому электропривод конвейера должен обеспечивать с определенной точностью стабилизацию скорости в заданном диапазоне. Например, конвейер TNG1200 должен обеспечивать движение скорости ленты в пределах от 0,435 м/с до 1,45 м/с, то есть диапазон регулирования электропривода должен составлять 3,33. DP1400 требуют Ленточные конвейеры типа регулирования скорости транспортной ленты от 1,6 м/с до 4 м/с, то есть необходимый диапазон регулирования – 2,5.

Следовательно, требования регулирования к диапазону скорости асинхронного двигателя в ленточных конвейерах довольно скромный. Однако, обеспечением необходимого диапазона регулирования наряду с система управления электротехническим комплексом конвейера должна обеспечивать электродвигателей случае многобарабанного синхронизацию движения В исполнения. Кроме того, при синтезе системы управления следует исключить колебательные переходные процессы в контуре стабилизации скорости, что актуально как для однобарабанных, так и для двухбарабанных конвейеров.

3.2 Структурно-параметрический синтез системы управления электротехническим комплексом однобарабанного ленточного конвейера

В связи с тем, что ленточные конвейеры не требуют большого диапазона регулирования скорости, нет необходимости применения системы векторного управления асинхронным двигателем. Поэтому при структурно-параметрическом синтезе электропривода стабилизации скорости воспользуемся системой скалярного управления с линейным законом регулирования напряжения в функции частоты.

Важный вопрос при создании электропривода ленточного конвейера – выбор структурного построения. Примем за базовую версию систему подчиненного регулирования (СПР) скорости асинхронного двигателя со скалярным управлением, но в отличие от традиционного подхода в качестве внутреннего контура организуем не контур регулирования тока статора, а контур электромагнитного момента (рисунок 3.1).

В соответствии с общей методикой синтеза СПР [14,17,48,64,74,96,97,101] объект управления, в качестве которого будем рассматривать асинхронный двигатель, необходимо разбить на два динамических звена, поскольку замкнутых контуров также два. Первое звено должно связывать электромагнитный момент $M_{\partial 1}$ с частотой питающего напряжения f_{11} , а второе – скорость вращения ротора двигателя ω_1 с моментом $M_{\partial 1}$.



Рисунок 3.1 – Предлагаемая структурная схема регулируемого электропривода ленточного конвейера с асинхронным исполнительным двигателем

Для выполнения поставленной задачи сначала определимся с общей передаточной функцией асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении. Если воспользоваться уравнениями (2.1), считать в первом приближении кинематическую цепь ленточного конвейера абсолютно жесткой и применить упрощенный метод линеаризации множительных звеньев, то можно получить известную передаточную функцию двигателя, связывающую скорость ω_1 с частотой f_{11} [90,91]

$$W_{\omega f1}(p) = \frac{\omega_{1}(p)}{f_{11}(p)} = \frac{k_{\omega f1}(b_{02}p+1)}{a_{02}p^{3} + a_{12}p^{2} + a_{22}p+1},$$
(3.1)
ГДе $k_{\omega f1} = \frac{2\pi}{Z_{n1}} \left\{ 1 + \frac{T_{11} \left[\Psi_{11X0}^{2} + \Psi_{11Y0}^{2} + \frac{k_{U1}Z_{n}}{2\pi} (\Psi_{11Y0} - \Psi_{11X0}) \right] L_{01}}{T_{21} (\Psi_{11X0} \Psi_{21X0} + \Psi_{11Y0} \Psi_{21Y0}) L_{11}} \right\};$

$$b_{02} = \frac{2\pi T_{11}}{Z_{n1}k_{\omega f1}}; \ a_{02} = \frac{2\Delta_{1}J_{1}T_{11}}{3Z_{n1}L_{01} (\Psi_{11x0} \Psi_{21x0} + \Psi_{11y0} \Psi_{21y0})};$$

$$a_{12} = \frac{2\Delta_{1}J_{1} (T_{11} + T_{22})}{3Z_{n1}L_{01} (\Psi_{11x0} \Psi_{21x0} + \Psi_{11y0} \Psi_{21y0})};$$

$$a_{22} = T_{11} + \frac{2\Delta_1 J_1 \left(1 - \frac{L_{01}^2}{L_{11}L_{21}'}\right)}{3Z_{n1}L_{01} \left(\psi_{11x0}\psi_{21x0} + \psi_{11y0}\psi_{21y0}\right)T_{22}};$$

 J_1 – полный приведенный к ротору двигателя момент инерции, который для однобарабанного ленточного конвейера равен $J_1 = J_{\partial 1} + \frac{J_{\delta 1}}{i_{p1}^2} + \frac{m}{i_{\delta 1}^2 i_{p1}^2}$

Применение принципа суперпозиции в предположении, что изменения скорости вращения ω_1 не происходит, позволяет получить из первых пяти уравнений системы (2.1) передаточную функцию части объекта управления, входящего во внутренний контур момента. Действительно, из (2.11) и (2.12) следует, что при $\omega_1 = 0$

$$\psi_{21x} = \frac{\frac{L_{01}}{L_{11}} \left(k_{U1} + \frac{2\pi}{Z_{n1}} \psi_{11y0} \right) T_{11} + \frac{2\pi}{Z_{n1}} \psi_{21y0} T_{21} \left(T_{11} p + 1 \right)}{\left(T_{11} p + 1 \right) \left(T_{21} p + 1 \right) - \frac{L_{01}^2}{L_{11} L_{21}'}} f_{11}.$$
(3.2)

$$\psi_{21y} = \frac{\frac{L_{01}}{L_{11}} \left(k_{U1} - \frac{2\pi}{Z_{n1}} \psi_{11x0} \right) T_{11} - \frac{2\pi}{Z_{n1}} \psi_{21x0} T_{21} \left(T_{11} p + 1 \right)}{\left(T_{11} p + 1 \right) \left(T_{21} p + 1 \right) - \frac{L_{01}^2}{L_{11} L_{21}'}} f_{11}.$$
(3.3)

Подставляя (3.2) и (3.3) в пятое уравнение системы (2.1) получим взаимосвязь переменной $M_{\partial 1}$ с частотой питающего напряжения f_{11}

$$M_{\partial 1} = \frac{3Z_{n1}L_{01}}{2\Delta_{1}} \left\{ \frac{\Psi_{11y0} \left[\frac{L_{01}}{L_{11}} \left(k_{U1} + \frac{2\pi}{Z_{n1}} \Psi_{11y0} \right) T_{11} + \frac{2\pi}{Z_{n1}} \Psi_{21y0} T_{21} \left(T_{11}p + 1 \right) \right]}{(T_{11}p + 1) (T_{21}p + 1) - \frac{L_{01}^{2}}{L_{11}L_{21}^{\prime}}} \right] f_{11} - \frac{\Psi_{11x0} \left[\frac{L_{01}}{L_{11}} \left(k_{U1} - \frac{2\pi}{Z_{n1}} \Psi_{11x0} \right) T_{11} - \frac{2\pi}{Z_{n1}} \Psi_{21x0} T_{21} \left(T_{11}p + 1 \right) \right]}{(T_{11}p + 1) (T_{21}p + 1) - \frac{L_{01}^{2}}{L_{11}L_{21}^{\prime}}} f_{11} \right\}}$$

$$(3.4)$$
Переходя в (3.4) к приращениям координат и изображениям Лапласа, получим искомую передаточную функцию

$$W_{Mf1}(p) = \frac{M_{\partial 1}(p)}{f_{11}(p)} = \frac{k_{Mf1}(b_{02}p+1)}{a_{03}p^2 + a_{13}p+1},$$
(3.5)

;

где

$$k_{Mf1} = \frac{3Z_{n1}L_{01}}{2\Delta_1 \left(1 - \frac{L_{01}^2}{L_{11}L_{21}^2}\right)} \begin{cases} \frac{2\pi}{Z_{n1}} \left[(\Psi_{11X0}\Psi_{21X0} + \Psi_{11Y0}\Psi_{21Y0})T_{21} + (\Psi_{11X0}\Psi_{21X0} + \Psi_{11Y0}\Psi_{21Y0})T_{21} + (\Psi_{11X0}\Psi_{11X0} + \Psi_{11Y0}^2)T_{11}\frac{L_{01}}{L_{11}} \right] \\ + \left(\Psi_{11X0}^2 + \Psi_{11Y0}^2\right)T_{11}\frac{L_{01}}{L_{11}} \right] + \left(\Psi_{11Y0} - \Psi_{11X0}\right)k_{U1}T_{11}\frac{L_{01}}{L_{11}} \\ a_{03} = \frac{T_{11}T_{21}}{1 - \frac{L_{01}^2}{L_{11}L_{21}^2}}; a_{13} = \frac{T_{11} + T_{21}}{1 - \frac{L_{01}^2}{L_{11}L_{21}^2}}. \end{cases}$$

Передаточная функция, связывающая скорость вращения ротора двигателя ω_1 с моментом $M_{\partial 1}$, получается делением выражения (3.1) на (3.5)

$$W_{\omega M1}(p) = \frac{\omega_{1}(p)}{M_{\partial 1}(p)} = \frac{W_{\omega f1}(p)}{W_{Mf1}(p)} = \frac{k_{\omega M1} \left(a_{03} p^{2} + a_{13} p + 1 \right)}{a_{02} p^{3} + a_{12} p^{2} + a_{22} p + 1},$$
(3.6)

$$\Gamma \mathcal{A} e \qquad k_{\omega M1} = \frac{k_{\omega f1}}{k_{Mf1}} = \frac{2\Delta_{1} \left(1 - \frac{L_{01}^{2}}{L_{11}L_{21}^{2}} \right)}{3Z_{n1}L_{01}(\psi_{11X0}\psi_{21X0} + \psi_{11Y0}\psi_{21Y0})T_{21}}.$$

Предположим, что для организации замкнутого контура момента применен соответствующий датчик, причем коэффициент передачи обратной связи по моменту обозначим k_{ocM1} . В состав этого контура кроме датчика момента входит регулятор момента с передаточной функцией $W_{PM1}(p)$, силовой частотный преобразователь и полученное выше динамическое звено (3.5). Частотный преобразователь можно в первом приближении описать апериодическим звеном с передаточной функцией [21,29,42,66,88,98,104]

$$\frac{k_{cn1}}{T_{cn1}p+1},$$
 (3.7)

где k_{cn1} и T_{cn1} – коэффициент передачи и постоянная времени частотного преобразователя.

Необходимо отметить, что в качестве постоянной времени T_{cn1} в (3.7) следует принимать не период широтно-импульсной модуляции силовых транзисторов, а период смены информации на входе частотного преобразователя [73,108-111].

Применение методики параметрического синтеза регуляторов СПР подразумевает, прежде всего выбор какого-либо оптимума (технического или симметричного) настройки контура. В отличие от традиционного подхода с целью снижения перерегулирования в переходном процессе выходной координаты потребуем, чтобы разомкнутый контур момента имел передаточную функцию

$$W_{p \to c_{M1}}(p) = \frac{1}{4T_{\mu 1}p(T_{\mu 1}p+1)},$$
(3.8)

где T_{μ} – малая некомпенсируемая постоянная времени. Фактическая передаточная функция разомкнутого контура момента асинхронного двигателя имеет вид

$$W_{pa_{3M1}}(p) = W_{PM1}(p) \frac{k_{cn1}k_{Mf1}k_{ocM1}(b_{02}p+1)}{(T_{cn1}p+1)(a_{03}p^2+a_{13}p+1)}.$$
(3.9)

Приравнивая (3.9) к (3.8) и принимая за малую постоянную времени $T_{\mu l} = T_{cnl}$ удвоенную постоянную времени частотного преобразователя, найдем требуемую передаточную функцию регулятора момента

$$W_{PM1}(p) \frac{k_{cn1}k_{Mf1}k_{ocM1}(b_{02}p+1)}{(T_{cn1}p+1)(a_{03}p^2+a_{13}p+1)} = \frac{1}{4T_{cn1}p(T_{cn1}p+1)}.$$
(3.10)

Из (3.10) получается требуемая передаточная функция регулятора момента должна быть равна

$$W_{PM1}(p) = \frac{a_{03}p^2 + a_{13}p + 1}{4T_{cn1}k_{cn1}k_{Mf1}k_{ocM1}p(b_{02}p + 1)}.$$
(3.11)

Следовательно, для обеспечения желаемого переходного процесса в замкнутом контуре регулирования электромагнитного момента асинхронного двигателя со скалярным управлением необходим пропорционально-интегральнодифференциальный (ПИД) регулятор с апериодическим фильтром на входе. При этом коэффициент передачи пропорциональной составляющей равен

$$k_{nPM1} = \frac{a_{13}}{4T_{cn1}k_{cn1}k_{Mf1}k_{ocM1}},$$
(3.12)

постоянная времени интегрирования определяется формулой

$$T_{uPM1} = 4T_{cn1}k_{cn1}k_{Mf1}k_{ocM1}, \qquad (3.13)$$

постоянная дифференцирования рассчитывается по выражению

$$T_{\partial PM1} = \frac{a_{03}}{4T_{cn1}k_{cn1}k_{Mf1}k_{ocM1}},$$
(3.14)

а постоянная времени апериодического фильтра равна

$$T_{\phi M1} = b_{02} \,. \tag{3.15}$$

То есть для реализации передаточной функции (3.11) необходим регулятор вида

$$W_{PM1}(p) = \frac{1}{\left(T_{\phi_{M1}}p+1\right)} \left(k_{nPM1} + \frac{1}{T_{uPM1}p} + T_{\partial PM1}p\right).$$
(3.16)

Такой регулятор, как правило, входит в состав стандартного набора функциональных блоков многих частотных преобразователей. Примером могут послужить инверторы Micromaster 440, Sinamics G120 и Simovert Masterdrives VC.

С учетом формул (3.11) – (3.16) передаточная функция замкнутого контура момента будет равна

$$W_{_{3M1}}(p) = \frac{1}{k_{_{ocM1}} \left(4T_{_{cn1}}^2 p^2 + 4T_{_{cn1}} p + 1 \right)}.$$
(3.17)

Для выбора параметров регулятора скорости $W_{PC1}(p)$ системы управления асинхронным двигателем однобарабанного ленточного конвейера в соответствии с методикой синтеза СПР [61,67,68,105-107] передаточную функцию (3.17) аппроксимируем апериодическим звеном

$$W_{_{3M1}}(p) \approx \frac{1}{k_{_{oCM1}} \left(4T_{_{cn1}}p+1\right)}.$$
(3.18)

С учетом (3.18) передаточная функция разомкнутого контура скорости будет равна

$$W_{pa3c1}(p) = W_{PC1}(p) \frac{k_{occ1}k_{\omega M1}(a_{03}p^2 + a_{13}p + 1)}{k_{ocm1}(4T_{cn1}p + 1)(a_{02}p^3 + a_{12}p^2 + a_{22}p + 1)}.$$
 (3.19)

Опять же с позиций исключения перерегулирования в переходном процессе контура скорости потребуем, чтобы желаемая передаточная функция этого разомкнутого контура была равна

$$W_{p \to cc1}(p) = \frac{1}{4T_{\mu 2} p(T_{\mu 2} p + 1)},$$
(3.20)

Приравнивая (3.19) к (3.20) и принимая за малую постоянную времени $T_{\mu 2} = 4T_{cn1}$, получим уравнение для определения необходимой передаточной функции регулятора скорости

$$W_{PC1}(p) \frac{k_{occ1}k_{\omega M1}(a_{03}p^2 + a_{13}p + 1)}{k_{ocm1}(4T_{cn1}p + 1)(a_{02}p^3 + a_{12}p^2 + a_{22}p + 1)} = \frac{1}{16T_{cn1}p(4T_{cn1}p + 1)}.$$
 (3.21)

Из (3.21) следует, что нам нужен регулятор скорости с передаточной функцией

$$W_{PC1}(p) = \frac{k_{ocm1} \left(a_{02} p^3 + a_{12} p^2 + a_{22} p + 1 \right)}{16T_{cn1} k_{occ1} k_{\omega M1} p \left(a_{03} p^2 + a_{13} p + 1 \right)}.$$
(3.22)

Техническая реализация такого регулятора средствами цифровой техники возможна, однако предлагается использовать в качестве регулятора скорости стандартный пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор с апериодическим фильтром на входе

$$W_{PC1}(p) = \frac{k_{ocM1}(a_{22}p+1)}{16T_{cn1}k_{occ1}k_{\omega M1}p(a_{13}p+1)}.$$
(3.23)

То есть нам необходим ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_{PC1}(p) = \frac{1}{\left(T_{\phi c1} p + 1\right)} \left(k_{nPC1} + \frac{1}{T_{uPC1} p}\right),$$
(3.24)

где

$$k_{nPC1} = \frac{k_{oCM1}a_{22}}{16T_{cn1}k_{oCC1}k_{\omega M1}},$$
(3.25)

$$T_{uPC1} = \frac{16T_{cn1}k_{occ1}k_{\omega M1}}{k_{ocm1}},$$
(3.26)

$$T_{\phi c1} = a_{13}. \tag{3.27}$$

С учетом (3.23) передаточная функция замкнутого по скорости электропривода будет иметь вид

$$W_{3c1}(p) = \frac{\omega_1(p)}{\omega_{13}(p)} = \frac{b_{04}p^3 + b_{14}p^2 + b_{24}p + 1}{k_{occ1}\left(a_{04}p^7 + a_{14}p^6 + a_{24}p^5 + a_{34}p^4 + a_{44}p^3 + a_{54}p^2 + a_{64}p + 1\right)}, (3.28)$$

где
$$b_{04} = a_{02}a_{03}$$
; $b_{14} = a_{22}a_{13} + a_{03}$; $b_{24} = a_{22} + a_{13}$; $a_{04} = 64a_{02}a_{13}T_{cn1}^{3}$;
 $a_{14} = 64T_{cn1}^{2} \Big[a_{12}a_{13}T_{cn1} + a_{02} (a_{13} + T_{cn1}) \Big]$;
 $a_{24} = 16T_{cn1} \Big[4a_{22}a_{13}T_{cn1}^{2} + 4a_{12} (a_{13} + T_{cn1})T_{cn1} + a_{02} (a_{13} + 4T_{cn1}) \Big]$;
 $a_{34} = 16T_{cn1} \Big[4a_{13}T_{cn1}^{2} + 4a_{22} (a_{13} + T_{cn1})T_{cn1} + a_{12} (a_{13} + 4T_{cn1}) + a_{02} \Big]$;
 $a_{44} = 16T_{cn1} \Big[4(a_{13} + 4T_{cn1})T_{cn1} + a_{22} (a_{13} + 4T_{cn1}) + a_{12} \Big] + a_{22}a_{03}$;
 $a_{54} = 16T_{cn1} \Big[a_{13} + a_{22} + 4T_{cn1} \Big] + a_{22}a_{13} + a_{03}$; $a_{64} = a_{22} + a_{13} + 16T_{cn1}$.

Передаточная функция (3.28) позволяет анализировать на этапе проектирования динамические свойства электропривода ленточного конвейера.

3.3 Компьютерное моделирование электропривода однобарабанного ленточного конвейера

Смоделируем разработанную систему стабилизации скорости, когда в **BG315S4** качестве исполнительного применен асинхронный двигатель однобарабанного ленточного конвейера TNG1200. При ЭТОМ В первом приближении будем считать, что кинематические цепи конвейера обладают абсолютной жесткостью, а частотный преобразователь имеет следующие коэффициент передачи и постоянную времени: $k_{cn1} = 0,01$ В/дискрета; $T_{cn1} = 0,01$ с. Для рассматриваемого случая асинхронный двигатель в соответствии с формулами (3.5) и (3.6) имеет передаточные функции

$$W_{Mf1}(p) = \frac{M_{\partial 1}(p)}{f_{11}(p)} = \frac{3,2901 \cdot 10^4 (0,038p+1)}{0,0337p^2 + 1,6018p+1},$$
$$W_{\omega M1}(p) = \frac{\omega_1(p)}{M_{\partial 1}(p)} = \frac{9,5041 \cdot 10^{-5} (0,0337p^2 + 1,6081p+1)}{1,5644 \cdot 10^{-5}p^3 + 7,4412 \cdot 10^{-4}p^2 + 0,0383p+1}$$

Расчет по формулам (3.11) – (3.15) показывает, что для рассматриваемого конвейера регулятор момента должен иметь следующие параметры передаточной функции

$$k_{nPM1} = 0,0373$$
; $T_{uPM1} = 42,9718$ c; $T_{\partial PM1} = 0,00078368$ c; $T_{\phi M1} = 0,038$ c,

то есть

$$W_{PM1}(p) = \frac{1}{(0,038p+1)} \left(0,0373 + \frac{1}{42,9718p} + 0,00078368p \right)$$

ИЛИ

$$W_{PM1}(p) = \frac{0,0337 \, p^2 + 1,6018 \, p + 1}{42,9718 \, p \left(0,038 \, p + 1\right)}.$$
(3.29)

Передаточная функция (3.29) получена при коэффициенте обратной связи по моменту $k_{ocm1} = 3,2653$ дискрет/Нм.

В соответствии с формулами (3.23) – (3.27) в предположении, что коэффициент обратной связи по скорости равен $k_{occ1} = 52,1487$ дискретс/рад, рассчитаны параметры регулятора скорости

$$k_{nPC1} = 157,7942; T_{uPC1} = 0,00024286 \text{ c}; T_{\phi c1} = 1,6018 \text{ c}.$$

Таким образом, требуемая передаточная функция регулятора скорости должна быть равна

$$W_{PC1}(p) = \frac{1}{(1,6018p+1)} \left(157,7942 + \frac{1}{0,00024286p}\right)$$

ИЛИ

$$W_{PC1}(p) = \frac{0,0383p+1}{0,00024286p(1,6018p+1)}.$$
(3.30)

С учетом формул (3.29) и (3.30) передаточная функция (3.28) принимает следующие численные значения

$$W_{3c1}(p) = \frac{0,0192(0,0012905p^{3}+0,0951p^{2}+1,6401p+1)}{1,6038\cdot10^{-9}p^{7}+2,3766\cdot10^{-7}p^{6}+1,5714\cdot10^{-5}p^{5}+6,9581\cdot10^{-4}p^{4}+}, (3.31)$$
$$+0,022p^{3}+0,3639p^{2}+1,8001p+1$$

Моделирование передаточной функции (3.31) в программе Matlab Simulink (рисунок 3.1) позволяет построить график переходного процесса по управляющему воздействию в разрабатываемом электроприводе ленточного конвейера (рисунок 3.2).



Рисунок 3.1– Расчетная модель электропривода, полученная в соответствии с передаточной функцией (3.31)



Рисунок 3.2– График переходного процесса по управляющему воздействию в приводе ленточного конвейера, построенная по передаточной функции (3.31)

Анализ графика показывает, что переходный процесс имеет, как и предполагалось, монотонный характер, а время переходного процесса равно $t_{nn} = 0,556$ с.

Оценку адекватности формулы (3.28) проведем методом компьютерного моделирования, разработав двухконтурную расчетную модель электропривода стабилизации скорости асинхронного двигателя с учетом передаточных функций регуляторов, объекта управления и датчиков обратной связи (рисунок 3.3). График переходного процесса по управляющему воздействию, полученный с помощью этой модели, полностью совпадает с графиком, приведенным на рисунке 3.2.



Рисунок 3.3 – Расчетная линеаризованная модель разработанного двухконтурного электропривода стабилизации скорости однобарабанного конвейера

Это позволяет утверждать, что передаточная функция разработанного двухконтурного электропривода стабилизации скорости однобарабанного ленточного конвейера найдена правильно, а методика выбора параметров регуляторов позволяет достичь требуемые динамические свойства.

Проверим работоспособность разработанного электропривода однобарабанного ленточного конвейера с учетом нелинейных свойств электродвигателя и упруго-диссипативных свойств транспортной ленты. В этом случае его структурная схема принимает вид, приведенный на рисунке 3.4.

С учетом того, что асинхронный двигатель представляет собой нелиненйый объект, его фактический коэффициент передачи по моменту k_{мf1} оказывается меньше расчетной величины, полученной по формуле (3.5). Поэтому в расчетной (рисунок 3.5) это учтено коррекцией постоянной времени нелинейной модели интегрирования регулятора момента, которая стала равна $T_{uPM1} = 1,6$ с. На заметное уменьшение этой величины также влияет нелинейность типа «ограничение по фактически действует частотном преобразователе. уровню», которая В Действительно, коэффициент гармонической такой нелинейности зависит от амплитуды входного сигнала а [78,81,108]

$$q = \frac{2k}{\pi} \left(\arcsin \frac{c}{ak} + \frac{c}{ak} \sqrt{1 - \frac{c^2}{a^2 k^2}} \right),$$

где *k* – коэффициент передачи этого звена (в нашем случае *k* =1), *c* – величина, на которой ограничивается выходной сигнал.

И поскольку в переходных режимах форсирующие свойства регуляторов приводят к появлению сигналов, превышающих величину ограничения, коэффициент передачи прямой цепи контура момента уменьшается.

Перечисленные выше явления в системе частотный преобразователь – асинхронный двигатель также приводят к уменьшению величины $T_{\partial PM1}$, которой в результате можно пренебречь.



Рисунок 3.4 – Структурная схема разработанного двухконтурного электропривода стабилизации скорости однобарабанного конвейера с учетом нелинейностей и упруго-диссипативных свойств транспортной ленты



Рисунок 3.5 – Расчетная модель разработанного двухконтурного электропривода стабилизации скорости однобарабанного конвейера с учетом нелинейностей и упруго-диссипативных свойств транспортной ленты

84

Поскольку коэффициент k_{Mf1} уменьшился, а общий коэффициент передачи асинхронного двигателя $k_{\omega f1}$ остается постоянным и приблизительно равным

$$k_{\omega f1} = \frac{2\pi}{Z_{n1}}$$
, то это приводит к увеличению коэффициента передачи $k_{\omega M1} = \frac{k_{\omega f1}}{k_{Mf1}}$. В результате в соответствии с формулой (3.26) увеличивается постоянная времени регулятора скорости $T_{uPC1} = \frac{16T_{cn1}k_{occ1}k_{\omega M1}}{k_{ocm1}}$. Это учтено в расчетной нелинейной модели разработанного двухконтурного электропривода стабилизации скорости однобарабанного конвейера, приведенной на рисунке 3.5.

Компьютерное моделирование показывает, что, как и требовалось, в переходном процессе скорости движения ленты практически отсутствует перерегулирование (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6– График переходного процесса скорости движения V₂ ленточного конвейера при подаче приращения частоты приблизительно на 1 Гц

При разгоне конвейера до номинальной скорости и дальнейшем ее уменьшении на 25 % скорость транспортной ленты уменьшается монотонно (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7– График разгона ленты конвейера до номинальной скорости и дальнейшего ее снижения на 25 %

В результате процесс растяжения ленты при разгоне происходит плавно (рисунок 3.8), а при торможении колебательные процессы в ней не наблюдаются (рисунок 3.9). При этом перемещение груза от контрбарабана происходит по закону, приведенному на рисунке 3.10.

Моделирование процесса движения ленты при уменьшении загрузки конвейера в 10 раз показывает, что электропривод продолжает устойчиво работать с требуемыми характеристиками по стабилизации скорости (рисунок 3.11). Однако, если измерение скорости будет совершаться с некоторой аддитивной помехой, изменяющейся по синусоидальному закону, то упругие колебания транспортной ленты возникнут (рисунок 3.12). При амплитуде погрешности измерения скорости в 5 %, периодическое изменение деформации ленты в рассматриваемом конвейере составит порядка 4 мм.



Рисунок 3.8 – График разности перемещений *S*₁-*S*₂ ленты на противоположных барабанах при разгоне и торможении



Рисунок 3.9 – График изменения растяжения транспортной ленты при торможении в случае применения разработанного электропривода конвейера



Рисунок 3.10 – График перемещения S₂, при разгоне и изменении скорости электропривода



Рисунок 3.11– График разгона ленты конвейера до номинальной скорости и дальнейшего ее снижения на 25 % при уменьшении загрузки в 10 раз

88



Рисунок 3.12 – График изменения растяжения транспортной ленты при погрешности измерения скорости вращения ротора асинхронного двигателя

3.4 Структурно-параметрический синтез системы управления электротехническим комплексом двухбарабанного ленточного конвейера

Приведенные выше результаты показывают, что структурнопараметрический синтез электропривода однобарабанного ленточного конвейера произведен успешно и достиг поставленных целей. Поэтому каждый асинхронный двигатель двухбарабанного конвейера оснастим предложенным электроприводом стабилизации скорости, и при расчете настроек регуляторов будем пользоваться разработанной методикой параметрического синтеза регуляторов.

Для двухбарабанного ленточного конвейера, рассмотренного во второй главе и оснащенного двумя асинхронными двигателями АИР225М4, расчет параметров регуляторов дает следующие результаты для каждого электропривода: $k_{nPM1} = k_{nPM2} = 0,0511$; $T_{uPM1} = T_{uPM2} = 28,8493$ c; $T_{\partial PM1} = T_{\partial PM2} = 0,00085784$ c; $T_{\phi M1} = 0,0259$ c, $k_{nPC1} = k_{nPC2} = 72,0349$; $T_{uPC1} = T_{uPC2} = 0,0003623$ c; $T_{\phi c1} = T_{\phi c2} = 1,474$ с. С учетом корректировки параметров регуляторов в функции нелинейностей асинхронных двигателей и частотных преобразователей расчетная модель электротехнического комплекса двухбарабанного ленточного конвейера будет выглядеть следующим образом (рисунок 3. 13).

Разработанная расчетная модель позволяет провести исследование характеристик конвейера с двумя приводными барабанами в разных режимах работы. Например, с ее помощью построен график изменения скорости движения транспортной ленты при разгоне до номинальной скорости и дальнейшем ее снижении на 25 % (рисунок 3.14). Анализ этого графика позволяет сказать, что при выбранных параметрах регуляторов электротехнический комплекс конвейера работает устойчиво, при этом перемещение транспортной ленты происходит по закону, приведенному на рисунке (3.15). Следует отметить, что график переходного процесса изменения скорости в «малом» отличается незначительным перерегулированием (рисунок 3.16). При идентичности параметров асинхронных лвигателей И каналов управления приводными барабанами растяжения транспортной ленты вообще не наблюдается (рисунок 3.17). Однако, если, например, коэффициент передачи по моменту одного из двигателей отличается на 25 % от другого, то на этапе разгона приводов конвейера происходит переходный процесс в растяжении ленты (рисунок 3.18). Анализ графика показывает, что максимальная величина растяжения $x_1 - x_2$ не превышает 0,1 мм, чем можно пренебречь.

Другой возможной причиной возникновения колебаний в упругой транспортной ленте является погрешность измерения момента и скорости соответствующими датчиками разработанных электроприводов. Действительно, если датчик момента одного из электроприводов имеет аддитивную помеху, изменяющуюся по синусоидальному закону, то в процессе растяжения ленты будут наблюдаться колебания (рисунок 3.19).

90



Рисунок 3.13 – Расчетная модель электротехнического комплекса двухбарабанного ленточного конвейера с учетом двухконтурных систем стабилизации скорости приводных барабанов



Рисунок 3.14 – График разгона ленты конвейера до номинальной скорости и дальнейшего ее снижения на 25 %



Рисунок 3.15 – График изменения во времени перемещения транспортной ленты при разгоне до номинальной скорости и дальнейшем ее снижения на 25 %



Рисунок 3.16 – График переходного процесса изменения скорости движения конвейера в «малом»



Рисунок 3.17 – График растяжения транспортной ленты при идентичности каналов управления приводными барабанами



Рисунок 3.18 – График переходного процесса в растяжении транспортной ленты при разгоне приводов конвейера в случае различия коэффициентов передачи



Рисунок 3.19 – График растяжения транспортной ленты при синусоидальном характере помехи датчика момента одного из электроприводов

Однако при амплитуде помехи, составляющей 5 % от фактического значения момента, максимальная величина периодического растяжения транспортной ленты не превышает 0,6 мм для рассматриваемого конвейера.

Разработанная расчетная модель двухбарабанного конвейера позволяет также построить график изменения растяжения транспортной ленты при синусоидальной помехе датчика скорости одного из электроприводов (рисунок 3.20).



Рисунок 3.20 – График растяжения транспортной ленты при синусоидальном характере помехи датчика скорости одного из электроприводов

Он показывает, что при амплитуде помехи, составляющей 5 % от фактического значения скорости, амплитуда периодического растяжения транспортной ленты составляет 5,8 см. Очевидно, что такая величина упругих колебаний будет оказывать существенной влияние на ресурс работы конвейера до капитального ремонта из-за усиленного износа ленты.

Для исключения этого недостатка предлагается в систему управления электротехническим комплексом двухбарабанного конвейера ввести перекрестные связи по разности сигналов датчиков углов поворота роторов асинхронных двигателей (рисунок 3.21).



Рисунок 3.21 – Структурная схема электротехнического комплекса двухбарабанного ленточного конвейера с перекрестными связями по разности сигналов датчиков углов поворота роторов двигателей

Для этого необходимо каждый из двигателей оснастить соответствующими датчиками, производить вычисление рассогласования между сигналами этих датчиков и вводить разностный сигнал, усиленный в $k_{\Delta\alpha}$ раз в контур управления скоростью каждого канала с разным знаком. При этом следует ожидать, что произойдет синхронизация движения приводных барабанов независимо от помех измерения скорости и колебательные процессы растяжения-сжатия конвейерной ленты будут подавлены. Подобным образом поступали в двухстоечных координатно-расточных станках для синхронизации движения концов поперечин.

Ключевым моментом в синтезе такой системы управления конвейером с двумя приводными барабанами является выбор коэффициента передачи $k_{\Delta\alpha}$, позволяющий минимизировать амплитуду колебаний процесса растяжения транспортной ленты.

Следует обратить внимание на то, что каждый из каналов управления в соответствии с (3.31) в первом приближении описывается дифференциальным уравнением седьмого порядка, а колебательные процессы в транспортной ленте – дифференциальным уравнением второго порядка. В связи с этим поставленную задачу корректного выбора величины $k_{\Delta\alpha}$ можно выполнить только численными методами, например, моделированием предлагаемой системы управления электротехническим комплексом двухбарабанного ленточного конвейера а программе Matlab Simulink (рисунок 3.22).

Проведенная серия компьютерного моделирования показала, что при $k_{\Delta\alpha} = 1$, амплитуда колебаний процесса растяжения транспортной ленты в предлагаемой системе управления составит 1,15 мм (рисунок 3.23), то есть уменьшится в 50 раз по сравнению с системой без перекрестных связей по углам поворота роторов двигателей. При $k_{\Delta\alpha} = 2$ амплитуда колебаний составит 0,58 мм (рисунок 3.24), а при $k_{\Delta\alpha} = 4 - 0,29$ мм (рисунок 3.25), то есть увеличение коэффициента $k_{\Delta\alpha}$ приводит к уменьшению амплитуд колебаний процессов растяжения-сжатия в транспортной ленте. Однако, при $k_{\Delta\alpha} = 8$ амплитуда колебаний резко увеличивается и составит 1,72 м (рисунок 3.26).



Рисунок 3.22 Расчетная модель электротехнического комплекса двухбарабанного ленточного конвейера с перекрестными связями по разности сигналов датчиков углов поворота роторов двигателей



Рисунок 3.23 – График растяжения транспортной ленты при синусоидальном характере помехи датчика скорости и введении перекрестных связей по углам

поворота роторов приводных двигателей при $k_{\Delta\alpha} = 1$



Рисунок 3.24 – График растяжения транспортной ленты при синусоидальном характере помехи датчика скорости и введении перекрестных связей по углам поворота роторов приводных двигателей при $k_{\Delta\alpha} = 2$



Рисунок 3.25 – График растяжения транспортной ленты при синусоидальном характере помехи датчика скорости и введении перекрестных связей по углам поворота роторов приводных двигателей при $k_{\Delta\alpha} = 4$



Рисунок 3.26 – График растяжения транспортной ленты при синусоидальном характере помехи датчика скорости и введении перекрестных связей по углам поворота роторов приводных двигателей при $k_{\Delta\alpha} = 8$

Это вызвано тем, что процесс движения конвейера приобретет ярко выраженный колебательные характер (рисунки 3.27 и 3.28).



Рисунок 3.27 – График перемещения транспортной ленты при $k_{\Delta\alpha} = 8$



Рисунок 3.28 – График изменения скорости при действии помехи датчика скорости и $k_{\Delta\alpha} = 8$

Проведенные исследования показали, что граничным значением, колебательный характер движения разделяющим ленты, является для рассматриваемого конвейера $k_{\Delta\alpha} = 5,1$. Следовательно, взяв определенный запас от этого значения, можно считать, что найденная величина $k_{\Delta\alpha} = 4$ дает наилучший результат, снижая амплитуды колебаний в 200 раз.

101

3.5 Выводы по третьей главе

1. Сформулированы требования к диапазону регулирования и характеру переходных процессов в системе управления электротехническим комплексом ленточного конвейера.

2. Предложено в электроприводе ленточного конвейера использовать двухконтурную систему подчиненного регулирования скорости с внутренним контуром регулирования момента.

3. Произведен параметрический синтез регуляторов электропривода, обеспечивающий требуемый диапазон регулирования, монотонный характер переходных процессов и отсутствие колебаний в упругой системе транспортной ленты однобарабанного конвейера.

4. Показано, что при идентичности каналов управления и разработанной методике синтеза регуляторов в двухбарабанном ленточном конвейере также отсутствуют колебания процессов растяжения и сжатия транспортной ленты.

5. Выявлено, что основным фактором, влияющим на несинхронность вращения приводных барабанов, является погрешность измерения скорости.

6. Разработана система синхронизации движения барабанов в двухдвигательном приводе ленточного конвейера, замкнутая по разности сигналов датчиков угла поворота роторов асинхронных двигателей.

7. Предложена методика синтеза регуляторов системы управления электротехническим комплексом двухбарабанного конвейера, обеспечивающая снижение амплитуд колебаний в упругой системе транспортной ленты в 200 раз и увеличение ресурса ее работы.

4 РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

4.1 Обоснование необходимости разработки вычислителей координат электропривода ленточного конвейера

Разработанный электропривод ленточного конвейера содержит, как минимум, два необходимых для его функционирования и обеспечения требуемых характеристик датчика: датчик момента, развиваемого асинхронным двигателем, и датчик скорости вращения ротора. Этого набора датчиков достаточно для получения необходимого диапазона регулирования скорости и демпфирования упругих колебаний транспортной ленты однобарабанного конвейера.

Однако, в электроприводах конвейеров с двумя приводными барабанами для синхронизации их вращения и снижения амплитуд возможных колебательных процессов в упругой системе требуется также применение датчиков углов поворота роторов исполнительных двигателей.

Встройка таких датчиков в существующие серийно выпускаемые конвейеры зачастую невозможна, поскольку в этом случае необходима конструкторская переработка их механизмов, приводящих в движение барабаны. Поэтому разработка так называемых бездатчиковых электроприводов для ленточных конвейеров несомненно является актуальной задачей. И это является современной тенденцией в области развития электроприводов переменного тока.

Следует отметить, что термин «бездатчиковый электропривод» является несколько условным, поскольку в частотных преобразователях необходимым для реализации защит электропривода является наличие датчиков тока. Однако, применение таких датчиков не затрагивает вопросы пересмотра механической конструкции электропривода, поскольку они располагаются внутри силового блока частотного преобразователя. Кроме того, предпосылкой для разработки вычислителей координат, которые часто называют наблюдателями, является тот факт, что в частотных преобразователях кроме тока статора двигателя переменного

тока несложно померить также и величину фактического напряжения. Поэтому имея информацию о напряжении и токе статора разработаем устройства, позволяющие вычислить момент асинхронного двигателя, его скорость и угол поворота ротора.

4.2 Разработка вычислителя момента асинхронного двигателя

На основе первичных датчиков фазных токов и напряжений и с использованием согласующих элементов могут создаваться схемы вычислителей (наблюдателей) различных величин, непосредственное измерение которых требует внесения изменения в конструкцию исполнительного механизма. В таких схемах реализуется вычисление измеряемой величины на основе известных соотношений, которые связывают искомую величину с величинами, непосредственно измеряемыми с помощью первичных датчиков. Для создания электропривода ленточного конвейера с требуемыми техническими показателями необходима разработка прежде всего наблюдателя момента. Работа вычислителя момента асинхронного двигателя может быть основана на математическом аппарате, который используется для описания обобщенной электрической машины.

Электромагнитный момент для обобщенной машины согласно [42,112] вычисляется по формуле

$$M_{\partial 1} = \frac{3}{2} Z_n \left(\psi_{11y} I_{11x} - \psi_{11x} I_{11y} \right) .$$
(4.1)

Проекция потокосцепления на ось *х* может быть получена из уравнения электрического равновесия цепи статора [68,113,114]

$$U_{11x} = I_{11x} R_{11} + \frac{d\psi_{11x}}{dt}.$$

Отсюда следует, что

$$\psi_{11x} = \int (U_{11x} - I_{11x} R_{11}) dt \,. \tag{4.2}$$

Аналогично формуле (4.2) можно записать выражение для проекции потокосцепления статора на ось у

$$\psi_{11y} = \int \left(U_{11y} - I_{11y} R_{11} \right) dt \tag{4.3}$$

В выражениях (4.2) и (4.3) фигурируют проекции векторов тока и напряжения статора на вращающуюся вместе с магнитным полем систему координат, которые могут быть определены по известным формулам трехфазно-двухфазного преобразования [42,68,123-125]

$$I_{11x} = \frac{3}{2} I_{A};$$

$$I_{11y} = \sqrt{3} I_{B} + \frac{\sqrt{3}}{2} I_{A};$$

$$U_{11x} = \frac{3}{2} U_{A};$$

$$U_{11y} = \sqrt{3} U_{B} + \frac{\sqrt{3}}{2} U_{A},$$
(4.4)

где I_A и U_A – измеренные значения тока и напряжения фазы A; I_B и U_B – измеренные значения тока и напряжения фазы B.

Все приведенные соотношения реализуются в устройстве, структурная схема которого приведена на рисунке 4.1.

Известна также формула для вычисления момента асинхронного двигателя по мгновенным значениям фазных токов и напряжений [88]

$$M_{\partial 1} = \frac{3}{2} Z_n \left\{ \left(I_B - I_C \right) \int \left(U_A - I_A R_{11} \right) dt - I_A \int \left[U_B - \left(I_B - I_C \right) R_{11} \right] dt \right\}.$$
(4.5)

Предположим, что векторы токов сдвинуты по отношению к векторам напряжений на угол ф. Тогда из формулы (4.5) после тригонометрических преобразований можно получить следующее выражение для момента двигателя

$$M_{\partial l} = K I_m \left(U_m \cos \varphi - I_m R_{l1} \right), \tag{4.6}$$

где U_m и I_m – амплитудные значения фазных напряжения и тока статора; K – коэффициент пропорциональности.

В соответствии с формулой (4.6) разработана структурная схема вычислителя момента асинхронного двигателя (рисунок 4.2) [6,35,122].



Рисунок 4.1 – Исходная структурная схема вычислителя момента асинхронного двигателя



Рисунок 4.2 – Преобразованная структурная схема вычислителя момента асинхронного двигателя

Такой вычислитель момента может применяться в разработанном электроприводе ленточного конвейера. Однако известные методы определения угла сдвига фаз ф между напряжением и током очень инерционны. Причем

задержка в вычислении этого угла увеличивается с уменьшением частоты напряжения статора, что может привести к неустойчивости разработанной системы управления электротехническим комплексом ленточного конвейера.

Поэтому перейдем в наблюдателе момента к действующим значениям измеряемых с помощью соответствующих датчиков фазных токов и напряжений.

Ток статора асинхронного двигателя связан с моментом на валу известной зависимостью [66]

$$I_{11} = \sqrt{I_{01}^2 + \frac{\left(I_{11HOM}^2 - I_{01}^2\right)M_{\partial 1}^2}{M_{HOM1}^2}},$$
(4.7)

где $I_{11\mu om}$ – номинальный ток статора; I_{01} – ток холостого хода.

Из (4.7) получим связь между моментом нагрузки $M_{\partial 1}$, током статора и номинальными характеристиками двигателя

$$M_{\partial 1} = M_{HOM1} \sqrt{\frac{\left(I_1^2 - I_0^2\right)}{I_{1nom}^2 - I_0^2}}.$$
(4.8)

При этом надо учитывать, что ток холостого хода зависит от частоты питающего напряжения [66,115-117]

$$I_{01} = \frac{k_{U1}f_{11}}{\sqrt{\left(R_{11} + R_{01}\right)^2 + \left(2\pi f_{11}L_{11}\right)^2}},$$
(4.9)

где R_{01} – активное сопротивление цепи намагничивания.

Подставляя формулу (4.9) в (4.8), получим выражение для вычисления момента асинхронного двигателя по измеренному действующему значению тока I_{11} и заданной частоте питающего напряжения статора f_{11}

$$M_{\partial 1} = M_{HOM1} \sqrt{\frac{\left[I_{11}^{2} - \left(\frac{k_{U1}f_{11}}{\sqrt{\left(R_{11} + R_{01}\right)^{2} + \left(2\pi f_{11}L_{11}\right)^{2}}\right)^{2}}\right]}{I_{11HOM}^{2} - \left(\frac{k_{U1}f_{11}}{\sqrt{\left(R_{11} + R_{01}\right)^{2} + \left(2\pi f_{11}L_{11}\right)^{2}}}\right)^{2}}.$$
(4.10)

В соответствии с формулой (4.10) разработана структурная схема наблюдателя момента асинхронного двигателя (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 – Структурная схема наблюдателя момента асинхронного двигателя

На входы наблюдателя, вычисляющего текущее значение момента, подаются каждый такт измеренные значения действующего фазного тока и заданная частота питающего напряжения. Величины $(R_{11} + R_{01})^2$, I_{11hom}^2 и M_{hom} задаются и вычисляются заранее до включения электропривода.

Для определения возможной погрешности наблюдателя момента были проведены натурные эксперименты на лабораторной установке, оснащенной асинхронным двигателем A-51-4 и нагрузочной машиной постоянного тока (рисунок 4.4). Скорость двигателя при проведении эксперимента регулировалась с помощью частотного преобразователя «Омега», а измерение скорости осуществлялось с помощью тахогенератора ТМГ 30. Измерение тока $I_{11ном}$ и мощности *P*, потребляемой электродвигателем, также производилось с помощью частотного преобразователя, имеющего такие встроенные функции. Измеренные значения фиксировались с помощью дисплея инвертора (рисунок 4.5).


Рисунок 4.4 – Экспериментальная установка в виде испытуемого асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока, сопряженных между собой

	🜔 Ua 🜔 Ub 🔵 Uc 🚫 Ud
	I вых 4,3 А Парам 0,4
0	

Рисунок 4.5 – Дисплей частотного преобразователя «Омега», отображающего информацией о токе статора

Двигатель A-51-4 имеет следующие технические характеристики: номинальное фазное напряжение $U_{1hom} = 220$ В; мощность $P_{1hom} = 4500$ Вт; $f_{11hom} = 50$ Гц; $Z_p = 2$; $I_{1hom} = 9,4$ А. Параметры T-образной схемы замещения этого двигателя, полученные из данных каталога, имеют следующие значения: $L_{11} = 0,1839$ Гн; $R_{11} = 1,513$ Ом; $L'_{21} = 0,188$ Гн; $R'_{21} = 1,158$ Ом; $L_{01} = 0,1782$ Гн, $R_{01} = 1,166$ – а постоянные времени цепей статора и ротора равны $T_1 = 0,0099$ с, $T_2 = 0,0132$ с.

Тахогенератор ТМГ 30 имеет выходное напряжение 280 В при скорости вращения 4000 об/мин, то есть имеет коэффициент передачи $k_{m2} = 1,496$ рад/Вс, что позволяет определить угловую скорость ω_{max} в ходе эксперимента.

В частотном преобразователе «Омега» используется линейный закон регулирования напряжения в функции частоты, поэтому для рассматриваемого двигателя $k_{U1} = 4,388$ В/Гц.

Эксперимент проводился при двух значениях частоты питающего напряжения 25 Гц и 50 Гц и двух значениях момента нагрузки. Момент на валу асинхронного двигателя изменялся с помощью нагрузочной машины постоянного тока ПН-45 со следующими номинальными данными: мощность $P_{HOM}^{\partial nm} = 2,6$ кВт; скорость $n_{HOM}^{\partial nm} = 1460$ об/мин; напряжение $U_{HOM}^{\partial nm} = 115$ В; ток $I_{HOM}^{\partial nm} = 22,6$ А. В соответствии с этими данными конструктивный коэффициент рассматриваемого двигателя постоянного тока равен

$$C_{M} \Phi = \frac{30 P_{HOM}^{\partial nm}}{\pi n_{HOM}^{\partial nm}} = 0,7524 \text{ Hm/A}.$$

В ходе эксперимента измерялся ток якоря нагрузочной машины и ток статора асинхронного двигателя. С помощью найденного конструктивного коэффициента производилось вычисление момента фактическое значение на валу испытуемого двигателя по формуле

$$M_{\partial 1} = C_M \Phi I_{\mathfrak{s}},$$

причем это значение принималось за эталон. Также проводилось вычисление по формуле (4.10), реализуемой наблюдателем момента $M_{\partial 1 pacy}$, и находилась относительная ошибка наблюдателя как

$$\Delta_{M} = \frac{M_{\partial 1 pacy} - M_{\partial 19}}{M_{\partial 19}} \times 100, \%.$$

Результаты экспериментов и вычислений сведены в таблицу 4.1

Наименование	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3	Измерение 4
$f_{_{11}},$ Гц	50	50	25	25
I_{s}, \mathbf{A}	5	10	5	10
<i>I</i> ₁₁ , A	3,95	4,35	3,95	4,4
$M_{\partial^{19}},$ Нм	3,76	7,52	3,76	7,52
<i>М</i> _{д1расч} ,Нм	3,82	7,38	3,96	7,45
$\Delta_{_M}$, %	1,6	-1,9	5,3	0,9

Таблица 4.1 – Результаты экспериментов и вычислений по оценке погрешности разработанного наблюдателя момента

Данные таблицы показывают, что погрешность разработанного наблюдателя (вычислителя) момента асинхронного двигателя не превышает 5,3 %, что позволяет использовать его при бездатчиковой технической реализации электропривода ленточного конвейера. Причем на погрешность вычислений оказывает существенное влияние точность измерения действующего значения тока статора. Поэтому применение более точного датчика тока позволит снизить погрешность вычисления момента асинхронного двигателя.

4.3 Разработка вычислителя скорости асинхронного двигателя

Построение вычислителя скорости асинхронного двигателя при частотном скалярном управлении можно производить различными способами [10,120,121]. Однако, для решения поставленной задачи с целью улучшения метрологических характеристик вычислителя предлагается использовать следующее упрощенное представление об изменении скорости асинхронного двигателя (рисунок 4.6). Будем считать, что при вариации напряжения U_{11} на статорной обмотке асинхронного двигателя (без изменения частоты) критическая скорость ω_{κ} , соответствующая критическому скольжению, остается неизменной, а критический момент изменяется пропорционально квадрату напряжения [42,66,88,98,118].



Рисунок 4.6 – Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения

Известно, что скорость идеального холостого хода ω_{01} асинхронного двигателя при изменении напряжения остается неизменной [42,88,66,119]. Падение скорости вращения ротора $\Delta \omega$ относительно ω_{01} разделим на две составляющие: $\Delta \omega_1$ – падение скорости под действием нагрузки; $\Delta \omega_2$ – изменение скорости вследствие уменьшения напряжения статора на величину ΔU_{11} .

Предположим, что участок механической характеристики асинхронного двигателя при изменении момента от 0 до номинального значения M_{nom} можно аппроксимировать линейной зависимостью. Тогда падение скорости под действием нагрузки будет подчиняться следующему выражению

$$\Delta \omega_{\rm l} = \frac{\left(\omega_{\rm 01} - \omega_{\rm 1HOM}\right) M_{\rm \partial 1}}{M_{\rm HOM1}}, \qquad (4.11)$$

где $M_{_{\partial 1}}$ – момент на валу двигателя; $\omega_{_{1 HOM}}$ – номинальная скорость.

Статическое изменение скорости $\Delta \omega_2$ под действием вариации напряжения статора предлагается вычислять с помощью линеаризованной математической модели асинхронного двигателя [91]. Переход к этой модели обусловлен тем, что для достижения малой погрешности в вычислении скорости асинхронного двигателя необходима более точная модель. В ней производится линеаризация уравнений (2.1) двигателя более точным методом, при котором произведение переменных представляется следующим образом

$$\begin{aligned}
\omega_{01}\psi_{11y} &= \frac{2\pi}{Z_{n1}} (\psi_{11y0}f_{11} + f_{110}\psi_{11y}); \\
\omega_{01}\psi_{11x} &= \frac{2\pi}{Z_{n1}} (\psi_{11x0}f_{11} + f_{110}\psi_{11x}); \\
(\omega_{01} - \omega_{1})\psi_{21y} &= \frac{2\pi}{Z_{n1}} (\psi_{21y0}f_{11} + f_{110}\psi_{21y}) - (\psi_{21y0}\omega_{1} + \omega_{010}\psi_{21y}); \\
(\omega_{01} - \omega_{1})\psi_{21x} &= \frac{2\pi}{Z_{n1}} (\psi_{21x0}f_{11} + f_{110}\psi_{21x}) - (\psi_{21x0}\omega_{1} + \omega_{010}\psi_{21x}); \\
\psi_{11y}\psi_{21x} &= \psi_{21x0}\psi_{11y} + \psi_{11y0}\psi_{21x}; \\
\psi_{11x}\psi_{21y} &= \psi_{21y0}\psi_{11x} + \psi_{11x0}\psi_{21y}, \end{aligned}$$
(4.12)

где f_{110} и ω_{010} – начальные условия частоты питающего напряжения и угловой скорости вращения магнитного поля, при которых производится линеаризация.

Подставляя (4.12) в систему уравнений (2.1), последовательно избавляясь от переменных и применяя метод аналогий можно найти с помощью результатов, полученных в [90], уточненную передаточную функцию асинхронного двигателя по отношению к изменению напряжения статора ΔU_{11} . При этом коэффициент передачи асинхронного двигателя по отношению к ΔU_{11} вычисляется по формуле

$$k_{aU1} = \frac{\Delta \omega_2}{\Delta U_{11}} = \frac{A_{11}A_{65} + A_{62}A_{76}}{A_{71}A_{84} + A_{63}A_{75}}, \qquad (4.13)$$
rge $A_{62} = (1+B^2 - DF)(AB - C)D + A_{20}A_{30};$

$$A_{63} = \left[\psi_{21y0}A_{20} + \psi_{21x0}(1+B^2 - DF)\right](1+B^2)T_{21};$$

$$A_{65} = A_{30}\left[(1+B^2)\psi_{11y0} - BF\psi_{21x0} - F\psi_{21y0}\right] + \\ + (1+B^2 - DF)\left[(C - AB)\psi_{21x0} - (A + BC)\psi_{21y0}\right];$$

$$A_{71} = (1+B^2 - DF)\left[(1+B^2)\psi_{11x0} - F\psi_{21x0} + BF\psi_{21y0}\right] - \\ -A_{20}\left[(1+B^2)\psi_{11y0} - BF\psi_{21x0} - F\psi_{21y0}\right]$$

$$A_{76} = (1+B^2 - DF)\left[(1+B^2)\psi_{11x0} - F\psi_{21x0} + BF\psi_{21y0}\right] - \\ -A_{20}\left[(1+B^2)\psi_{11y0} - BF\psi_{21x0} - F\psi_{21y0}\right]$$

$$A_{76} = (1+B^2 - DF)\left[(1+B^2)\psi_{11x0} - F\psi_{21x0} + BF\psi_{21y0}\right] - \\ -A_{20}\left[(1+B^2)\psi_{11y0} - BF\psi_{21x0} - F\psi_{21y0}\right]$$

$$A_{84} = (1+B^2)\psi_{21y0}\left[(1+B^2)\psi_{11y0} - F\psi_{21y0} - BF\psi_{21x0}\right]T_{21};$$

$$A = C = T_{11}; B = \frac{2\pi T_{11}f_{110}}{Z_{n1}}; D = \frac{L_{01}}{L_{11}}; F = \frac{L_{01}}{L_{21}};$$

$$A_{20} = (H - T_{21}\omega_{010})(1+B^2) + BDF; A_{30} = D(A + BC).$$

Поскольку асинхронный двигатель представляет нелинейный объект управления, то коэффициент $k_{\omega U1}$ будет изменять свое значение в зависимости от начальных условий, причем он существенно зависит от момента нагрузки. Не сложно заметить, что при M = 0 этот коэффициент также будет равен нулю. Предполагая линейную зависимость $k_{\omega U1}$ от момента нагрузки M_{o1} , можно рассчитать изменение скорости вращения ротора двигателя при вариации напряжения статора по формуле

$$\Delta \omega_2 = \frac{k_{\omega U1} \Delta U_{11} M_{\partial 1}}{M_{_{HOM1}}}, \qquad (4.14)$$

где используется значение $k_{\omega U1}$, определенное при номинальном моменте нагрузки M_{HOM1} .

В то же время величина $k_{\omega U1}$ зависит от частоты и действующего значения питающего напряжения U_{11} , причем, как показывают исследования, эта зависимость нелинейна. Если в частотном преобразователе используется линейный закон регулирования напряжения в функции частоты

$$U_{11} = k_{U1} f_{11},$$

где *k*_{*U1*} – коэффициент пропорциональности,

то приближенно зависимость коэффициента $k_{\omega U1}$ от f_{11} можно аппроксимировать формулой

$$k_{\omega U1} = k_{\omega U1.HOM} \left(\frac{f_{11HOM}}{f_{11}} \right)^{\left(a + \frac{b}{f_{11}}\right)}, \tag{4.15}$$

где f_{11hom} – номинальная частота; $k_{\omega U1.hom}$ – значение коэффициента $k_{\omega U1}$, определенное при номинальной частоте питающего напряжения; a и b – коэффициенты, определяемые в процессе идентификации зависимости.

Следует отметить, что величина $\Delta \omega_1$ всегда отрицательная, а знак $\Delta \omega_2$ зависит от знака приращения напряжения ΔU_{11} относительно номинального значения.

Таким образом, с учетом (4.11), (4.14) и (4.15) скорость вращения ротора асинхронного двигателя будет определяться уравнением

$$\omega_{1} = \omega_{01} - \Delta \omega_{1} + \Delta \omega_{2} = \omega_{01} - \frac{\left[\omega_{01}^{50} - \omega_{1hom} - k_{\omega U1.hom} \left(\frac{f_{11hom}}{f_{11}}\right)^{\left(a + \frac{b}{f_{11}}\right)} \Delta U_{11}\right] M_{\partial 1}}{M_{hom 1}}, (4.16)$$

где ω_{01}^{50} – скорость идеального холостого хода при номинальной частоте питающего напряжения.

Подставляя (4.10) в (4.16) получим аналитическое выражение для расчета скорости асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении

$$\omega_{1} = \frac{2\pi f_{11}}{Z_{n1}} - \left[\omega_{01}^{50} - \omega_{1host} - k_{\omega U1.host} \left(\frac{f_{11host}}{f_{11}} \right)^{\left(a + \frac{b}{f_{11}}\right)} \left(U_{11} - k_{U1} f_{11} \right) \right] \times \left\{ \frac{\left[\left(I_{11}^{2} - \left[\frac{k_{U1} f_{11}}{\sqrt{\left(R_{11} + R_{01}\right)^{2} + \left(2\pi f_{11} L_{11}\right)^{2}}} \right]^{2} \right]}{\sqrt{\left(I_{11}^{2} - \left[\frac{k_{U1} f_{11}}{\sqrt{\left(R_{11} + R_{0}\right)^{2} + \left(2\pi f_{11} L_{11}\right)^{2}}} \right]^{2} \right]} \right\}}, \quad (4.17)$$

Формулу (4.17) можно использовать при создании наблюдателя скорости асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении, который по измеренным (заданным) значениям частоты f_{11} и действующих значений фазного напряжения U_{11} и тока I_{11} статора вычисляет ω_1 (рисунок 4.7).

Величины Z_{n1} , ω_{01}^{50} , ω_{1hom} , I_{11hom} , f_{11hom} , k_{U1} определяются из паспортных данных исполнительного электродвигателя, коэффициенты $k_{\omega U1}$, *a* и *b* рассчитываются на основании результатов математического моделирования. Параметры схемы замещения асинхронного двигателя R_{11} , L_{11} и R_{01} могут быть найдены в справочниках по электрическим машинам.



Рисунок 4.7 – Упрощенная функциональная схема наблюдателя (вычислителя) скорости вращения асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении

Моделирование уравнений движения [32] асинхронного двигателя A51 в программной среде Matlab Simulink при номинальных значениях напряжения, частоты и момента нагрузки показало, что установившиеся значения (начальные условия) потокосцеплений равны $\psi_{11x0} = 1,431$ Bc, $\psi_{11y0} = -1,289$ Bc, $\psi_{21x0} = 1,328$ Bc, $\psi_{21y0} = -1,309$ Bc, при этом $\omega_{010} = 153,631$ рад/с. Расчет по формуле (4.13) с этими начальными условиями дает нам величину $k_{\omega U1,MoM} = 0,033$ рад/Bc. Компьютерное моделирование при разных частотах и действующих значениях напряжения позволило идентифицировать график зависимости $k_{\omega U1}$ от частоты f_{11} и определить величины необходимых для применения формулы (4.15) коэффициентов, которые оказались равными a = 1,2 и b = 1 Гц.

Для оценки погрешности вычисления скорости асинхронного двигателя по формуле (4.17) в предлагаемом наблюдателе были проведены натурные эксперименты на лабораторной установке, описанной выше и приведенной на рисунках 4.4 и 4.5.

Экспериментальные исследования проводились при вариации заданной частоты питающего напряжения от 2,5 до 50 Гц, при этом величина фазного напряжения U_{11} и тока I_{11} статора асинхронного двигателя фиксировалась с дисплея частотного преобразователя. Результаты экспериментов и вычислений скорости по формуле (4.17) приведены в таблице 4.2.

<i>f</i> ₁₁ , Гц	U_{11}, B	<i>I</i> ₁₁ , A	$\omega_{1 pacy}$,	$\omega_{_{1$ эксп}}, paд/c	$\Delta_{\omega}, \%$
			рад/с		
50	220	4,4	154,37	153,19	0,8
25	109,9	4	76,96	76,6	0,5
10	43,8	4	29,57	29,62	-0,2
5	22	3,7	14,1	13,76	2,45
2,5	11	3	6,55	6,28	4,3

Таблица 4.2 – Результаты экспериментов и вычислений по оценке погрешности разработанного наблюдателя скорости

За истинное значение скорости принималась величина $\omega_{1_{3\kappa cn}}$, получаемая с помощью тахогенератора, а относительная ошибка вычисления скорости Δ_{ω} по формуле (4.17) определялась как

$$\Delta_{\omega} = \frac{\omega_{1 pacy} - \omega_{1 skcn}}{\omega_{1 skcn}} \times 100, \%$$

Анализ данных таблицы 4.2 показывает, что максимальная относительная ошибка вычисления скорости вращения асинхронного двигателя при скалярном управлении в рассматриваемом частотном диапазоне не превышает 4,3%. Следовательно, полученную формулу можно использовать в наблюдателях скорости электроприводов переменного тока со скалярным управлением для создания систем управления электроприводом ленточного конвейера. Причем в диапазоне регулирования, требуемом для конвейера погрешность вычисления составляет менее 1 %.

4.4 Компьютерное моделирование системы управления электротехническим комплексом однобарабанного ленточного конвейера с разработанными вычислителями момента и скорости

Для оценки влияния погрешности разработанных наблюдателей момента и скорости двигателя работу асинхронного на системы управления электротехническим комплексом однобарабанного конвейера проведем компьютерное моделирование этой системы. Расчетная модель, разработанная в программе Matlab Simulink позволяет решить эту задачу (рисунок 4.8). На ней введены помехи вычислителей координат электропривода, изменяющиеся по синусоидальному закону, причем рассмотрен наихудший вариант, когда фазовый сдвиг между помехами составляет 180°. Величина амплитуды помехи наблюдателя момента взята равной 5% от максимальной величины сигнала, а вычислителя скорости – 1% от заданного значения.

Результаты моделирования показывают, что амплитуда колебаний в процессе растяжения транспортной ленты составляет менее 2 мм при длине конвейера 167,1 м (рисунок 4.9). При этом колебания скорости движения ленты равны 0,02 м/с при заданной скорости 1,07 м/с (рисунок 4.10), а движение ленты происходит монотонно в соответствии с графиком, приведенным на рисунке 4.11. Аналогичный характер движения наблюдается и на нижнем пределе требуемого диапазона регулирования, соответствующего 0,43 м/с (рисунок 4.12)

Следовательно, применение разработанных наблюдателей момента и скорости в однобарабанных конвейерах оправдано и обеспечивает требуемый диапазон регулирование и минимум упругих колебаний транспортной ленты.



Рисунок 4.8 – Расчетная модель электротехнического комплекса однобарабанного ленточного конвейера

с учетом погрешностей наблюдателей момента и скорости



Рисунок 4.9 – График растяжения транспортной ленты однобарабанного конвейера при синусоидальных помехах наблюдателей момента и скорости



Рисунок 4.10 – График изменения скорости однобарабанного конвейера при действии помех наблюдателей момента и скорости



Рисунок 4.11 – График перемещения транспортной ленты однобарабанного конвейера при действии помех наблюдателей момента и скорости



Рисунок 4.12 – График изменения скорости однобарабанного конвейера при действии помех наблюдателей и работе на нижнем пределе диапазона регулирования

4.5 Компьютерное моделирование системы управления электротехническим комплексом двухбарабанного ленточного конвейера с разработанными вычислителями параметров движения асинхронных двигателей

Разработанные наблюдатели обладают определенной погрешностью измерения момента и скорости асинхронного двигателя, причем эта погрешность может изменяться по гармоническому закону. Это один из наихудших вариантов вариации погрешности измерения, особенно для вычислителя скорости, поскольку, как показано в третьей главе, приводит к колебательным процессам в упругой системе транспортной ленты двухбарабанных конвейеров.

Для компенсации этих колебаний было предложено очень эффективное средство – введение перекрестных связей по сигналам датчиков углов поворота асинхронных двигателей, приводящих в движение барабаны. Однако, встройка датчиков углов требует модернизации механической части конвейеров, что во многих случаях невозможно сделать практически.

Одним из вариантов, который можно предложить в сложившейся ситуации является косвенное измерение углов поворота роторов асинхронных двигателей посредством интегрирования выходных сигналов наблюдателей скорости.

Для оценки эффективности такого подхода для исключения датчиков углов поворота из конструкции электротехнического комплекса двухбарабанного ленточного конвейера промоделируем его, заменив в модели реальные датчики операциями интегрирования сигналов датчиков скорости, обладающих синусоидальными помехами, сдвинутыми на фазовый угол 180° (рисунок 4.13).

Результаты моделирования показывают, замена реальных датчиков углов поворота роторов асинхронных двигателей операциями интегрирования выходных сигналов наблюдателей скорости не дает желаемого результата. Действительно, из графиков, приведенные на рисунках 4.14 и 4.15, следует, что размах колебаний процесса растяжения транспортной ленты составляет 57 мм, а колебания скорости на установившемся участке движения равны 0,015 м/с.



Рисунок 4.13 – Расчетная модель электротехнического комплекса двухбарабанного ленточного конвейерас с учетом погрешностей наблюдателей момента и скорости и перекрестных связей по разности интегралов сигналов скорости



Рисунок 4.14 — График растяжения транспортной ленты двухбарабанного конвейера при синусоидальном характере помех разработанных наблюдателей и введении перекрестных связей по разности интегралов сигналов скорости



Рисунок 4.15 – График изменения скорости движения транспортной ленты двухбарабанного конвейера при действии помех в выходных наблюдателей и введении перекрестных связей по разности интегралов сигналов скорости

Однако, характер перемещения транспортной ленты носит монотонный характер в соответствии с заданным законом изменения скорости (рисунок 4.16).



Рисунок 4.16 – График перемещения транспортной ленты двухбарабанного конвейера при действии помех в выходных сигналах разработанных наблюдателей момента и скорости и введении перекрестных связей по разности интегралов сигналов скорости.

Следовательно, в двухбарабанных конвейерах с целью увеличения ресурса работы транспортной ленты применения датчиков углов поворота роторов асинхронных двигателей необходимо. При этом вместо разработанных наблюдателей скорости можно применить дифференцирование выходных сигналов датчиков углов поворота. Расчетная модель такой системы управления электротехническим комплексом двухбарабанного конвейера приведена на рисунке 4.17. Она учитывает, что погрешность вычисления скорости в этом случае будет в основном определяться дискретизацией по времени и уровню процесса вычисления производной. При частоте замыкания программного цикла системного программного обеспечения электропривода в 100 Гц для рассматриваемого конвейера погрешность составит 8 дискрет скорости.



Рисунок 4.17 – Расчетная модель электротехнического комплекса двухбарабанного ленточного конвейера с перекрестными связями по разности сигналов датчиков углов поворота с учетом погрешностей наблюдателей момента и скорости

Компьютерное моделирование такой системы управления электротехническим комплексом конвейера с двумя приводными барабанами показывает, что амплитуда процессов растяжения-сжатия транспортной ленты при периодических помехах наблюдателей моментов и скорости крайне мала (рисунок 4.18).



Рисунок 4.18 – График растяжения транспортной ленты двухбарабанного конвейера при синусоидальных помехах наблюдателей момента и скорости и введении перекрестных связей по углам поворота роторов двигателей

То есть можно считать, что предлагаемая система управления электроприводами конвейера практически полностью погасила (задемпфировала) возможные упругие колебания в транспортной ленте. При этом размах колебаний скорости ленты на установившемся участке практически равен нулю (рисунок 4.19), а само движение ленты носит монотонный характер (рисунок 4.20).



Рисунок 4.19 – График изменения скорости движения транспортной ленты двухбарабанного конвейера при синусоидальных помехах наблюдателей координат и введении перекрестных связей по углам поворота роторов двигателей



Рисунок 4.20 – График перемещения транспортной ленты при действии помех наблюдателей момента и скорости и введении перекрестных связей по углам поворота роторов приводных двигателей

4.6 Выводы по четвертой главе

1. Предложено использовать в системах управления электротехнических комплексов ленточных конвейеров вычислителей (наблюдателей) момента и скорости, позволяющих значительно упростить привязку разработанного электропривода к действующим моделям конвейеров.

2. Разработан наблюдатель, позволяющий по измеренным значениям тока статора и частоты питающего напряжения вычислить момент асинхронного двигателя.

3. Разработан наблюдатель, использующий уточненную линеаризованную модель асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении и позволяющий по измеренным величинам тока, фазного напряжения и частоты вычислить скорость двигателя.

4. Проведены натурные эксперименты, показывающие, что погрешность наблюдателя момента асинхронного двигателя не превышает 6% от фактического значения, а погрешность наблюдателя скорости – 1% от реальной величины в диапазоне скоростей, необходимых для функционирования ленточного конвейера.

5. Методом компьютерного моделирования доказано, что амплитуда колебаний процесса растяжения транспортной ленты в однобарабанном конвейере длиной 167,1 м с разработанным электроприводом и наблюдателями момента и скорости не превышает 2 мм.

6. Предложено в ленточных конвейерах с двумя приводными барабанами использовать только датчики углов поворота роторов асинхронных двигателей и наблюдатели момента и скорости, что позволяет существенно снизить амплитуду упругих колебаний в транспортной ленте в условиях действиях периодических помех наблюдателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана линеаризованная математическая модель однобарабанного ленточного конвейера, учитывающая влияние упругих и диссипативных сил в транспортной ленте на работу асинхронного двигателя, причем расхождение результатов, полученных в линейной и нелинейной моделях, не превышает 1%.

2. Предложено в электроприводе ленточного конвейера использовать двухконтурную систему подчиненного регулирования скорости с внутренним контуром регулирования момента, причем произведенный параметрический синтез регуляторов обеспечивает требуемый диапазон регулирования, монотонный характер переходных процессов и отсутствие колебаний в упругой системе транспортной ленты однобарабанного конвейера.

3. Разработана система синхронизации движения барабанов в двухдвигательном приводе ленточного конвейера, замкнутая по разности сигналов датчиков угла поворота роторов асинхронных двигателей.

4. Предложена методика синтеза регуляторов системы управления электротехническим комплексом двухбарабанного конвейера, обеспечивающая снижение амплитуд колебаний в упругой системе транспортной ленты в 200 раз, что приводит к увеличению ресурса ее работы.

5. Разработан наблюдатель, позволяющий по измеренным значениям тока статора и частоты питающего напряжения вычислить момент асинхронного двигателя, погрешность которого не превышает 6% от фактического значения.

6. Разработан наблюдатель, использующий уточненную линеаризованную модель асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении и позволяющий по измеренным величинам тока, фазного напряжения и частоты вычислить скорость двигателя, погрешность не превышает 1% от реальной величины в диапазоне скоростей, необходимых для функционирования ленточного конвейера.

7. Методом компьютерного моделирования доказано, что амплитуда колебаний процесса растяжения транспортной ленты в однобарабанном конвейере длиной 167,1 м с разработанным электроприводом и наблюдателями момента и скорости не превышает 2 мм.

8. Предложено в ленточных конвейерах с двумя приводными барабанами использовать только датчики углов поворота роторов асинхронных двигателей и наблюдатели момента и скорости, что позволяет практически исключить упругие колебания в транспортной ленте в условиях действия периодических помех наблюдателей.

Рекомендации

1. Разработанный электропривод рекомендуется внедрять на предприятиях, производящих или эксплуатирующих ленточные конвейеры.

2. Результаты исследования могут быть использованы предприятиями, занимающимися разработкой электроприводов переменного тока.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшая разработка темы может быть направлена на создание систем управления электротехническими комплексами трех-, четырех- и пятибарабанных ленточных конвейеров. Перспективным направлением исследования также являются работы по совершенствованию вычислителей момента и скорости, позволяющие создавать электроприводы переменного тока с большим диапазоном регулирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Альтахер.Аббас.А.Карим Анализ работы схемы наблюдателя скорости двигателя постоянного тока. Текст / В. И Доманов. Альтахер.Аббас.А.Карим. Поволжская научно – практическая конференция Казанский Госудорственный Энергетический Университет г. Казань 2015.
- Альтахер.Аббас.А.Карим. Исследование моделей наблюдателей координат двигателя постоянного тока Текст / В.И. Доманов, А.В. Доманов, Альтахер Аббас А. Карим Материалы Международной Конференции Санкт-Петербургский государственный Технологический университет г. Санкт-Петербург 2016.
- Альтахер.Аббас.А.Карим Анализ работы модели асинхронного двигателя Текст / В.И. Доманов. Альтахер.Аббас.А.Карим. 2 Поволжская научно –практическая конференция Казанский Госудорственный Энергетический Университет г. Казань 2016.
- Альтахер.Аббас.А.Карим. Синтез и анализ схемы наблюдателя скорости двигателя постоянного тока. Текст / В.И. Доманов, А.В. Доманов, Альтахер Аббас А. Карим Материалы Международной Конференции Пермского националного исследовательского политехнического университнта Г. Пермь 2016. С. 140–142.
- Альтахер.Аббас.А.Карим. Анализ точности работы модели асинхронного двигателя. Текст / В.И. Доманов, Альтахер Аббас А. Карим. Материалы Международной Конференции Ивановский Государственный Энергетический Университет Г. Иваново 2017С.3-4
- Альтахер.Аббас.А.Карим. Анализ работы вычислителя момента асинхронного двигателя Текст / В.И. Доманов, А.В. Доманов, Альтахер Аббас А. Карим Материалы Международной Конференции Санкт-Петербургский государственный Технологический университет г. Санкт-Петербург 2017.
- Альтахер.Аббас.А.Карим. Анализ ошибок вычислителя момента вентильного двигателя. Текст / Альтахер.Аббас.А.Карим. В.И. Доманов, А.В. Доманов, Материалы Международной Конференции Калининградский Государственный Технический университет Г. Калининград 2017.
- Альтахер.Аббас.А.Карим. Анализ ошибок вычислителя скорости вентильного двигателя. Текст / Альтахер.Аббас.А.Карим. В.И. Доманов. Международной молодежной научной Конференции Казан. Государственный Энергетический Университет - 26-28 /4 /2017.
- 9. Альтахер.Аббас.А.Карим. Система управления карьерным транспортером. Текст / Альтахер.Аббас.А.Карим. В.И. Доманов. А.В. Доманов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2020, №6, с.27-33.

- 10. Анучин А.С. Системы управления электроприводов/ А.С. Анучин. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 273 с.
- 11.Афанасьев К.С., Глазырин А.С. Идентификация скорости асинхронного электродвигателя лабораторного стенда с помощью фильтра Калмана и наблюдателя Люенбергера // Электротехнические комплексы исистемы управления. 2012. № 4 (28). С. 66–69.
- 12. Афанасьев А.Ю. Моментный электропривод/ А.Ю. Афанасьев. Издательство Казанского гос. тех. Университета, 1997. 250 с.
- 13.Бабокин Г.И. Математическая модель энергосберегающего безредукторного электропривода скребкового конвейера / Г.И. Бабокин, В.А. Готовцева // Известия ТулГТУ. Технические науки. – 2018. №12 – с. 12-17.
- 14. Бишоп Р. Современные системы управления / Р. Бишоп, Р. Дорф. М.: Изд-во «Лаборатория базовых знаний», 2002. 592 с.
- 15.Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями.– СПб.: Энергоатомиздат, 1992.– 228 с.
- 16.Боровиков М.А. Следящий вентильный электропривод с вычислителями координат по сигналам датчика положения ротора двигателя /М. А. Боровиков, В. И. Доманов, Е. М. Нашатыркин // Электричество. 1999. № 10. С. 76–80.
- 17.Боровиков М.А. Расчет быстродействующих систем автоматизированного электропривода и автоматики. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1980. – 389 с.
- 18.Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. СПб: Энергоиздат СПб отд. 1992--288 с.
- 19.Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. М.: Энергоиздат- 1988- 224 с.
- 20.Браславский И.Я., Зюзев А.М., Костылев А.В. Исследования свойств систем «Тирсторный преобразователь напряжения асинхронный двигатель» с различными типами синхронизации// Электротехника. 2000-No 9 -c1-5.
- 21.Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Академия-2004. -256 с.
- 22.Бургин Б.Ш. Особенности вариантов астатической двухмассовой электромеханической системы стабилизации скорости // Электротехника. 1997-No.7 -с. 11-15.
- 23.Бургин Б. Ш. Управление скоростью движения при использовании двухмассовой электромеханической системы стабилизации момента в упругом звене // Электротехника. 1998-№12-с. 13-17.

- 24.Бычков М. Вентильно-индукторный электропривод: алгоритмы и системы управления / М. Бычков // Рынок Электротехники. 2008. № 1. С. 9–17.
- 25.Вдовин В.В. Адаптивные алгоритмы оценивателя координат бездатчиковых электроприводов переменного тока с расширенным диапазоном регулирования: Дис.... канд. техн. Наук Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2014. 244 с.
- 26.Вейц В.Л., Царев Г.В. Динамика и моделирование электромеханических приводов. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1992. – 228 с.
- 27.Виноградов, А.Б. Колодин И.Ю. Бездатчиковый асинхронный электропривод с адаптивно-векторной системой управления // Электричество. 2007. №2. С. 44–50.
- 28.Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2008. 298 с.
- 29.Волков Н. И. Электромашинные устройства автоматики / Н. И. Волков, В. П. Миловзоров. М.: Высшая школа, 1986. 335 с.
- 30.Воронин С. Г. Математическая модель для определения координат в Электроприводе с вентильным двигателем постоянного тока / С. Г. Воронин А. Р. Кузьмичев // Электричество. – 2000. – №3. – С. 34-38.
- 31.Галкин В.И. Транспортные машины / В.И. Галкин, Е.Е. Шешко. М.: Горная книга, 2010. 588 с.
- 32.Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. СПб.: КОРОНА принт, 2001. 320 с.26. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. Для вузов. 2-е изд. перераб. идоп. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704с.
- 33.Доманов В.И., Доманов А.В., Альтахер Аббас А.Карим. Расчет и анализ схемы наблюдателя скорости двигателя постоянного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016, № 5. С. 25–27.
- 34. Доманов В.И., Доманов А.В., Альтахер Аббас А.Карим. Синтез и анализ работы вычислителя скорости вентильного двигателя Текст / В.И. Доманов, А.В. Доманов, Альтахер Аббас А. Карим. «Электроника и электрооборудование транспорта» № 3 2017 С. 30-32.
- 35. Доманов В.И., Доманов А.В., Альтахер Аббас А.Карим. Работа системы управления асинхронного двигателя с вычислителем момента Текст / В.И. Доманов, А.В. Доманов, Альтахер Аббас А. Карим. «Электроника и электрооборудование транспорта» № 3 2018С. 38-40.

- 36.Доманов В.И., Доманов А.В., Альтахер Аббас А.Карим. Особенности работы системы управления двигателя постоянного тока с наблюдателем скорости Текст/ В.И. Доманов, А.В. Доманов, Альтахер Аббас А. Карим. «Промыроленные АСУ И Контроллеры» № 1,2018 С.18-21.
- 37. Доманов В.И., Доманов А.В. Элементы систем автоматики (канал управления) / В. И. Доманов, А. В. Доманов. Ульяновск: УлГТУ, 2009. 107 с.
- 38.Доманов, В. И. Управление и диагностика вентильного двигателя /В. И. Доманов,
 А. В. Доманов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011.
 №6. С. 56-59.
- 39.Доздров А.В разработка системы бездатчиквого векторного управления вентильно-индукторным двигателем с независимым возбуждением: дис. ...канд. техн наук,2008.
- 40.Донской Н.В., Иванов А.Г., Никитин В.М. Управляемый выпрямитель в системах автоматического управления /Под ред. А.Д.Поздеева. М.: Энергоатомиздат, 1984.–352с.
- 41. Дочвири Д.Н. Оптимизация динамики тиристорного электропривода с упругим звеном по критериям Калмана—Фробеньюса / Электротехника. -2004- Ne5- с. 6-13.
- 42. Елисеев В.А. Системы непрерывного управления электроприводов переменного тока / В.А. Елисеев М.: Моск. энерг. ин-т. 1985. 96 с.
- 43.Иванов, Г. М. Датчики крутящего момента в системах электроприводов /Г. М. Иванов, В. И. Новиков, В. В. Хмелев, В. Н. Ер//Электротехническая промышленность. Сер. 08, Комплектные устройства управления электроприводами. Электропривод. Обзорн. информ. М.Информэлектро, 1987. Вып. 3 (19). 48 с.
- 44.Ильинский Н.Ф. Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом. М.: Энергоатомиздат, 1981. 144 с.
- 45.Ишматов З.Ш. Микропроцессорное управление электроприводами и технологическими объектами. Полиномиальные методы. Екатеринбург: УЛТУ УПИ, 2008. 278 с.
- 46.Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. Москва, 2015. 80 с.
- 47.Кантович Л.И. Машины и оборудование для горно-строительных работ / Л.И. Кантович, Г.Ш. Казанович, В.В. Волков, Э.Ю. Воронова, А.В. Отраков. М.: Горная книга, 2013. 447 с.
- 48.Келим, Ю. М. Типовые элементы систем автоматического управления /Ю. М. Келим. М.: ФОРУМ: ИНФРА М, 2002. 384с.

- 49.Киселев Н.В., Мядзель В.Н., Рассудов А.Н. Электроприводы с распределенными параметрами. Л.: Судостроение, 1985. 220 с.
- 50.Ключев В.И., Теличко Л.Я. Оптимизация электропривода с упругой связью по критерию минимума колебательности в переходных процессах// Электричество. 1977-Ne1-с. 38-4.
- 51.Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. Для вузов. 2-е изд. перераб. И доп. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
- 52.Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
- 53.Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. СПб.:Энергоатомиздат 1994.–496 с.
- 54.Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984.– 831 с.
- 55.Костомаров А. С. Датчики обратных связей для электропривода / А. С. Костомаров, М. В. Могучев, А. Я. Микитченко // Вестник ОГУ. 2001. №3. С. 117-121.
- 56.Кравченко О.А. Проблемы выбора и реализации силоизмерительных устройств для систем управления усилиями в механически передачах технологичес-ких машин / О.А. Кравченко, Г.Я. Пятибратов. Новочеркасск: НГТУ,1997. 41 с. Деп. в ВИНИТИ 11.12.97, №3611-В97.
- 57. Краснощеков П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. М.: Изд-во МГУ, 1983.– 264 с.
- 58.Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение, 1976. 214 с.
- 59.Куржанский А.Б. Управление и наблюдение условиях неопределенности. М.: Наука, 1997. 392 с.
- 60.Ланграф С.В., Глазырин А.С., Афанасьев К.С. Применение наблюдателя Люенбергера для синтеза векторных бездатчиковых асинхронных электроприводов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2011 №. 6 С. 57–62.
- 61.Лебедев Е.Д., Неймарк В.Е., Пистрак М.Я. и др. Управление вентильными электроприводами постоянного тока. М.: Энергия, 1970. 197 с.
- 62. Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961. 824 с.
- 63. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). М.: Машиностроение, 1977. -464 с.

- 64. Машиностроение. Энциклопедия / ред. совет К.В. Фролов (пред.) и др. М.: Машиностроение. Электроприводы. Т. IV 2 / Л. Б. Масандилов, Ю. Н. Сергиевский, С.К. Козырев и др. Под. Ред. Л. Б. Масандилова, 2012. 520 с.
- 65.Мещеряков В.Н. Динамика электромеханических систем подъемно транспортных механизмов с асинхронным электроприводом //Монография. ЛГТУ-2002-120 с.
- 66.Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. М.: Машиностроение, 1990. 304 с.
- 67.Онищенко Г.Б. Электрический привод. М.: РАСХН, 2003. 320 с.
- 68.Осипов О.И. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод: учебное пособие по курсу «Типовые решения и техника современного электропривода» / О.И. Осипов. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 80 с.
- 69.Панкратов В.В., Котин Д.А. Синтез адаптивных алгоритмов вычисления скорости асинхронного электропривода на основе второго метода Ляпунова // Электричество. 2007. № 8. С. 48 53.
- 70.Патент на изобретение SU 1762378 A1 от 15.09.1992. Двухдвигательный электропривод/ Мещеряков В.Н.
- 71.Петров, Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей / Л.П. Петров. М.: Энергоиздат, 1981. 164 с.
- 72.Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотнорегулируемых электроприводах / А.Д. Поздеев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш.ун-та, 1998. – 172 с.
- 73.Поздеев, А. Д. Ограничение влияния квантования по уровню в цифровых электроприводах / А. Д. Поздеев, Е. А. Игошин // Исследование систем автоматизированных электроприводов : межвуз. сб. науч. тр. –Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та,1991. С. 4–14.
- 74.Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002. 303 с.
- 75.Пятибратов Г.Я. Методология комплексного исследования и проектирования электромеханических систем управления усилиями в упругих передачах ме ханизмов /Юж.-Рос. гос. техн. ун-т.– Новочеркасск, 1999.– 154 с.– Деп. В ВИНИТИ 29.06.99, № 2119–В99.
- 76. Пятибратов Г.Я. Математическое описание и моделирование систем компенсации силы тяжести с асинхронными частотно-регулируемыми электроприводами / Г.Я. Пятибратов, Д.В. Барыльник, О.А. Кравченко; Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск, 2006. – 150 с. – Деп. в ВИНИТИ 19.07.06, № 971-В2006.

- 77.Расудов Л.Н., Мядзель В.Н. Электроприводы с распределенными параметрами механических элементов. М: «Энергоатомиздат» 1987-144с.
- 78.Розенвассер Е.Н. Чувствительность систем автоматического управления / Е.Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов. Л.: Энергия, 1969. 208 с.
- 79. Рудаков И. М. Столяров, В. А. Дартау Асинхронные электроприводы с векторным управлением / И.М. Рудаков, В. А. Столяров, Л. : Энергоатомиздат, 1987. 136.
- 80.Рывкин С. Е. Синтез цифрового управления электроприводом с уиругими механическими передачами/ С. Е. Рывкин, Д. Б. Изосимов, С. В. Байда / Электричество. - 2004-No11-с. 46-55.
- 81.Санковский Е.А. Вопросы теории автоматического управления. М.: Высшая школа, 1971. 232 с.
- 82.Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1974. 328 с.102.
- 83.Сериков С.А. Оптмальная адаптиваная система управления электроприводами подвесных конвейеров / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. -ВГТУ-2004-227с.
- 84.Сили С. Электромеханическое преобразование энергии: пер. с англ. / Сили С.– М.: Энергия, 1968. 376 с.
- 85.Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. М.: Мир, 1971. 557с.
- 86.Слежановский О.В., Дацковский Л.Х., Кузнецов И.С. и др. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями. М.: Энергоатомиздат, 1983. 256с.
- 87.Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский. М.: Академия, 2006. 265 с.
- 88.Справочник по автоматизированному электроприводу / под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. М.: Энергоатомиздат, 1983. 616 с.
- 89. Спиваковский А.О. Карьерный конвейерный транспорт / А.О. Спиваковский, М.Г. Потапов, А.М. Котов. М.: НЕДРА, 1976. 264 с.
- 90.Стариков А.В., Лисин С.Л., Табачникова Т.В., Косорлуков И.А., Беляева О.С. Линеаризованная математическая модель погружного асинхронного двигателя // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2019. № 4 (64). С. 155 167.
- 91.Стариков А.В. Линеаризованная математическая модель асинхронного двигателя как объекта системы частотного управления // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2002. № 4 (16). С. 175 180.

- 92.Сухарев И.А. Управление конвейерными линиями на базе асинхронного электропривода в рамках АСУТП: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. В.: ВГТУ- 2003-178 с.
- 93. Тарасов Ю.Д., Юнгмайстер Д. А. Промежуточные приводы ленточных конвейеров. М: Индра-1996-157с.
- 94. Теличко Л.Я., Тарасов А.С. Математическое моделирование ленточного конвейера с двухдвигательным электроприводом// Вестник Воронежского государственного технического университета. -2007-том 3 No12 с. 82-86.
- 95. Теличко Л.Я., Тарасов А.С. Математическое моделирование распределенно упругого элемента с двухдвигательным электроприводом // Вестник Воронежского государственного технического университета. Воронеж, ВГТУ 2009, Том. 5 На3-с. 74-78.
- 96. Терехов, В. М. Элементы автоматизированного электропривода /В. М. Терехов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 224 с.
- 97. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов / В. М. Терехов, О. И. Осипов. М.: Академия, 2005. 304 с.
- 98. Тиристорные регуляторы напряжения для асинхронных двигателей: итоги наука и техн. ВИНИТИ. Сер. Электропривод и автоматизация промышленных установок / В. А. Чванов, В. И. Завьялов, З. М. Родина. 1990 No 10 с. 1-86.
- 99.Унгру Ф., Иордан Г. Системы согласованного вращения асинхронных электродвигателей. Л.: Энергия, 1971. –182 с.
- 100. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
- 101. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1979. 616 с.
- 102. Шахмейстер Л.Г., Дмитриев В.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров. М.: Металлургия 1987-394с.
- 103. Шиянов А.И., Медведев В.А., Морозов С.В. Асинхронный электрпривод с упругой нагрузкой и адаптивным регулятором. // Электричество. -2001No2. С. 47-49.
- 104. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
- 105. Электротехнический справочник. В 3 т. / под общ. ред. И. Н. Орлова. М.: Энергия, 1970.
- 106. Электротехнический справочник. В 3 т. / под общ. ред. М. Г. Чиликина. М.:Энергия, 1975.

- 107. Ямпольский Д.С. Орлова Т.А., Решмин Б.И. Определение динамических параметров электроприводов постоянного тока. –М.: Энергия, 1972. –56 с.
- 108. Barmish B.R. New tools for robustness of linear systems. New York: Mac Millan, 1995.
- 109. Crowder R.M. Electric Drives and Electromechanical Systems: Appli-cations and Control / R.M. Crowder. Oxford: Elsevier science & technology, 2006. 312 p.
- 110. Djaferis T.E. Robast control design: a polynomial approach. Boston: Kluwer, 1995.
- 111. Fitzgerald A.E., Kingsley C.JR., Umans S.D. Electric Machinery, 6th edition. McGraw-Hill, 2005.
- 112. James J. Allen, "Micro Electro Mechanical System Design", Taylor & Francis Group, pp.143, 2005.
- Joachim Holts, "Sensorless Speed and Posation Control of Induction Motor Drives", IEEE Electrical Machines and Drives Group, University of Wuppertal 4207 Wuppertal – Germany, IECON Roanoke VA, 2003.
- 114. Johnson M.A., Moradi M.H. PID Control New Identification and Design Methods London Springer 2005.
- 115. Krause P П., Wasynzuk R., Sudhoff S. Analysis of electric machinery and drive systems. 2 е изд. Нью-Йорк: A. John Wiley & Sons, 2002-613 pp.
- 116. Krishnan, R. Switched reluctance motor drives / R. Krishnan // CRC Press LLC, 2001.
- 117. Ludtke I. The Direct Control of Induction Motor: thesis. Department of Electronics and Information Technology. University of Glamorgan. May 1998.
- 118. Lyshevski, S.E. Electromechanical Systems and Devices / S.E. Lyshev-ski. Bosa Roca: Taylor & Francis Inc, 2008. 584 p.
- 119. Lyshevski, S.E. Electromechanical Systems, Electrical Machines and Applied Mechatronics / S.E. Lyshevski. Bosa Roca: Taylor & Francis Inc, 1999. 800 p.
- 120. Padiyar, K.R., Power system dynamics, John Wiley & Sons Ltd., Singapore, 1994.
- 121. Paul M. Anderson, A.A. Fouad, Power system control and stability, IEEE Press, 1994.
- 122. PSS program for power system simulation and analysis, PTI company, UK, 2000.
- 123. Machowsk, Jan, Bialek Janusz, Bumby James, Power system dynamics and stability, John Wiley & Sons, New York, 1997.
- 124. Schonfeld R. Digitale Regelung elektrischer Antriebe. Prof.Dr.-Ing.habil. Rolf Schonfeld. Berlin: Technik -1987 -240c.
- 125. Vas P. sensor less Vector and Direct Torque control. Oxford press,1998.

приложения



ООО «Сенгилеевский цементный завод» ул. Кооперативная, д. 5А, р.п. Цемзавод. Сенгилеевский р-н, Ульяновская обл., Россия, 433381 тел.: «7 (842) 332-91-33 8-800-700-63-63 | e-mail: kartushina@eurocem.ru



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Альтахера Аббаса А. Карима «Структурно-параметрический синтез электропривода ленточного конвейера с повышенной способностью демпфирования упругих колебаний»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Мы, нижеподписавшиеся, главный инженер Шлюгин А.И., и главный энергетик Туганов С.М., составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы соискателя Альтахера Аббаса А. Карима использованы при модернизации электротехнического комплекса конвейера. Применение предлагаемого электропривода в составе электротехнического комплекса конвейера позволило:

- стабилизировать динамические показатели комплекса в различных режимах работы;

- реализовать апериодический режим натяжения ленты конвейера.

Гл. инженер

Шлюгин А.И.

Гл. энергетик

Туганов С.М.

143



Общий вид Сенглеевского цементного завода.


Основные конвейеры подачи сырья.



Транспортные линии на складе сырья.